



Hinc patriam sustinet

**Instituto Superior de Agronomia**  
**Universidade Técnica de Lisboa**



# **FITO-ETAR UMA ECO-TECNOLOGIA APLICADA AO TRATAMENTO DE ÁGUAS RESIDUAIS:**

## **Análise do Comportamento Hidráulico**

**Ana Lúcia Mesquita Mendes**

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em:

**Engenharia do Ambiente**

Orientador: Doutor Rui Marçal de Campos Fernando

Co-Orientadora: Doutora Elizabeth da Costa Neves Fernandes de Almeida Duarte

### **Júri:**

Presidente: Doutora Elizabeth da Costa Neves Fernandes de Almeida Duarte, Professora Catedrática do Instituto Superior de Agronomia da Universidade Técnica de Lisboa.

Vogais: Doutor Rui Marçal de Campos Fernando, Professor Associado do Instituto Superior de Agronomia da Universidade Técnica de Lisboa;

Doutora Ana Fonseca Galvão, Professora Auxiliar do Instituto Superior Técnico da Universidade Técnica de Lisboa;

Mestre Marisa Isabel Lameiras da Silva, na qualidade de especialista.

Lisboa, 2010

## AGRADECIMENTOS

A elaboração desta dissertação de mestrado não seria possível sem o auxílio de diversas pessoas e entidades a quem gostaria de agradecer, todo o apoio concedido.

Gostaria de agradecer aos meus orientadores, Dr. Rui Marçal e Dra. Elizabeth Duarte, por toda a orientação e tempo dedicado.

Ao Departamento de Química Agrícola e Ambiental do Instituto Superior de Agronomia pelas condições disponibilizadas para a elaboração da presente dissertação. A todos os colaboradores, funcionários e docentes deste departamento que possibilitaram a realização em tempo útil desta dissertação, em especial à D. Paula pelo auxílio e paciência, ao Eng.º Miguel Martins pelas explicações à última da hora, à professora Amarilis de Varennes pela disponibilização de todo o material e finalmente ao professor Ernesto Vasconcelos pela cedência dos espaços necessários.

Um obrigado especial ao professor Fernando Girão pelas análises ao solo realizadas e pelo conhecimento partilhado.

À Câmara Municipal de Alcochete na pessoa da Eng.ª Cristina Caldas pela disponibilização das instalações da fito-ETAR da Barroca D'Alva e de toda a informação necessária para o trabalho de campo. Aos funcionários desta autarquia pelo apoio técnico e explicações prestadas.

Ao Ex.mo. Sr. Chefe de Estado-Maior da Força Aérea, General Luís Araújo pela autorização de acesso aos dados meteorológicos da região. À Base-Aérea nº6, na pessoa do Sargento-Chefe Victor Santos pela atenção e disponibilidade para os necessários esclarecimentos acerca dos dados.

A todos os colegas com quem cruzei, durante a fase de estudos, agradeço as lições de vida fora das aulas que me deram, especialmente ao trio Susana, Rute e Renata, companheiras de muitos sorrisos.

Gostaria de agradecer aos meus pais por todo o amor e formação que me proporcionaram. Pelo indispensável apoio na realização desta dissertação. Mesmo nos momentos mais complicados, estiveram sempre lá.

Ao Tiago, companheiro de todas as horas deste, já “longo”, percurso de estudos e de vida. Agradecer-te apenas parece pouco, mas as palavras serão sempre poucas para descrever tudo o que já partilhamos, por isso...obrigada do fundo do coração.

## RESUMO

Na implementação do saneamento básico em pequenos aglomerados populacionais, torna-se cada vez mais necessário difundir a utilização de tecnologias de baixo custo na construção/manutenção, mas que garantam eficiências de tratamento adequadas.

A construção de fito-ETAR nestes meios rurais permite reproduzir os mecanismos de degradação de poluentes, que ocorrem em zonas húmidas naturais, num sistema para depuração de águas residuais. O processo consiste em fazer passar a água residual através de um meio de enchimento (normalmente depois de pré-sedimentada), onde se desenvolvem raízes de macrófitos e comunidades microbianas, que degradam a matéria orgânica da água residual, assimilando ao mesmo tempo os nutrientes nela existentes.

O estudo do comportamento hidráulico destes sistemas alternativos de saneamento foi efectuado com base na análise da fito-ETAR da Barroca D`Alva, concelho de Alcochete.

A avaliação do comportamento e eficácia do traçador (Brometo de Potássio) introduzido, a medição do nível piezométrico no interior do leito e a análise dos hidrogramas dos caudais, permitiram o estudo do comportamento hidráulico e a elaboração de um modelo uni-dimensional simplificado aplicado ao transporte que ocorre no interior do leito, a partir de resultados obtidos da aplicação do traçador, que permite simular os tempos de retenção de um soluto não reactivo.

**Palavras-chave:** Fito-ETAR; Brometo; Evapotranspiração; Modelação; Tempo de Retenção Hidráulico.

## ABSTRACT

It became increasingly necessary to promote the use of low-cost technologies (in the construction and maintenance) on the implementation of sanitation in small agglomerations, yet never failing to ensure appropriate treatment efficiencies.

The construction of constructed wetlands, in these rural areas allows the reproducing of mechanisms of degradation of pollutants that occur in natural wetlands, in a system for waste water purification. The process consists of passing the wastewater through a medium (usually after being pre-sedimented), where, roots of macrophytes and microbial communities that degrade organic matter in wastewater assimilating the nutrients existing in it, grow.

The study of the hydraulic behavior of these alternative systems of sanitation was based on the analysis of constructed wetland of Barroca D'Alva in Alcochete with a subsurface horizontal flow.

The performance evaluation and effectiveness of the tracer (potassium bromide) introduced, the measurement of water level inside the bed and the analysis of the hydrographs of the flow, allowed a study of the hydraulic behavior and also the development of a simplified one-dimensional model applied to the transport that occurs within the bed, which allows to model the detention times of a non reactive solute.

Keywords: Constructed wetlands; Bromide; Evapotranspiration; Modeling; Hydraulic residence time

## EXTENDED ABSTRACT

Water is one of the most important resources that exist on Earth because it is essential to all life forms.

The population growth recorded in the world leads to a high water consumption which has harmful consequences for the quantity and quality of the existing water.

The increased consumption of water also generates a greater volume of effluent, that require a suitable solution, otherwise there is danger of contamination of ecosystems. This reality underscores the urgent need to develop and adapt technologies economically viable for wastewater treatment.

The use of constructed wetlands for wastewater treatment has increased in recent decade's mainly small scale and for individual homes or even to small communities. These can produce a treated effluent to the biological level (standards for secondary and tertiary treatment) with low pathogen content; this level of treatment can be obtained with minimal inputs or mechanical energy and even operating support.

Hydraulic processes influence contaminant removal in various ways and some aspects of these relationships remain unexplained. Efficiency of contaminant removal in wetlands is highly related to the extent of contact between wastewater and the reactive surfaces on the medium.

A good method for determining and analyzing constructed wetland flow paths is using the evaluation of hydraulic residence time (HRT) by the impulsion tracer method.

The resulting HRT distribution gives information about mixing and dispersion in a medium, it is also possible to create models to study hydrological behavior in constructed wetlands. Two ideal reactors are commonly used: the plug flow reactor and the continuous flow steady-state reactor.

Our experiments used the data collected on a subsurface horizontal flow wetland (in Barroca D'Alva- Alcochete). The medium detention time was established with the standard method of a stimulus-response experiment. The objectives of this tracer test with a conservative ionic tracer (bromide) were to characterize solute transport.

Keywords: Constructed wetlands; Bromide; Evapotranspiration; Modeling; Hydraulic residence time.

## ÍNDICE GERAL

Agradecimentos .....	ii
Resumo.....	iii
Abstract.....	iv
Extended Abstract.....	v
Índice Geral.....	vi
Índice de Figuras.....	viii
Índice de Quadros .....	x
Índice de Anexos.....	xi
Lista de Abreviaturas.....	xii
<b>1. Introdução.....</b>	<b>1</b>
1.1. A Dinâmica da Água.....	1
1.2. O Tratamento das Águas Residuais no Panorama Nacional .....	1
1.3. Objectivos do Estudo .....	3
<b>2. Revisão Bibliográfica.....</b>	<b>4</b>
2.1. As Zonas Húmidas Naturais.....	4
2.2. Caracterização das Fito-ETAR.....	6
2.3. Componentes das Fito-ETAR: Os seus Mecanismos e Processos de Remoção de Poluentes.....	7
2.3.1. <i>Matriz/Meio de Enchimento</i> .....	10
2.3.2. <i>Espécies Botânicas</i> .....	11
2.4. Comportamento Hidráulico das Fito-ETAR.....	12
2.4.1. <i>Balanço Hidráulico</i> .....	12
2.4.2. <i>Características do Escoamento</i> .....	14
2.5. Traçador: Ião Brometo .....	18
2.6. Modelação do Escoamento .....	20
<b>3. Estudos de Campo em Fito-ETAR.....</b>	<b>21</b>
3.1. Descrição do Local de Estudo.....	21
3.2. Instalações e Equipamentos Existentes no Local.....	22
<b>4. Material e Métodos .....</b>	<b>24</b>
4.1. Preparação Prévia do Local de Estudo .....	24
4.2. Procedimento de Análise do Sistema .....	25
4.2.1. <i>Metodologias de Análise das Amostras Recolhidas</i> .....	27
<b>5. Resultados Obtidos e sua Discussão .....</b>	<b>30</b>

5.1.	Caracterização do Meio de Enchimento .....	30
5.2.	Resultados das Análises Laboratoriais Pré-injecção do Traçador .....	30
5.3.	Variação de Caudais e Nível Piezométrico no Leito .....	32
5.4.	Evapotranspiração diária.....	35
5.5.	Temperaturas Máxima e Mínima, Precipitação e Insolação.....	36
5.6.	Comportamento do Traçador .....	38
5.7.	Balanço de Brometos no Sistema .....	40
5.8.	Matéria Orgânica no Enchimento do Leito.....	42
5.9.	Tempo de Retenção Hidráulico .....	43
<b>6.</b>	<b>Modelação do Comportamento Hidráulico .....</b>	<b>45</b>
<b>7.</b>	<b>Conclusões.....</b>	<b>51</b>
<b>8.</b>	<b>Bibliografia .....</b>	<b>53</b>
	Anexos .....	57
	Anexo I – Caudais da fito-ETAR .....	xi
	Anexo II – Níveis piezómetros .....	xii
	Anexo III – Armazenamento dos sub-volumes do leito 5.....	xiv
	Anexo IV – Massa de iões brometo emitida no efluente.....	xvi
	Anexo V – Massa de iões brometo na solução do enchimento .....	xviii
	Anexo VI – Massa de iões brometo extraída das diferentes partes dos macrófitos.....	xix
	Anexo VII – Matéria Orgânica .....	xx

## ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1.1 - POPULAÇÃO RESIDENTE POR MUNICÍPIO EM PORTUGAL NO ANO DE 2009.....	2
FIGURA 1.2 - REALIDADE PORTUGUESA QUANTO AOS TIPOS DE TRATAMENTO DE ÁGUAS RESIDUAIS, A PROVENIÊNCIA DOS PONTOS DE DESCARGA E DO DESEMPENHO DOS SISTEMAS INSTALADOS. ....	3
FIGURA 2.1 - POSICIONAMENTO DAS ZONAS HÚMIDAS ENTRE OS ECOSISTEMAS CONTINENTAIS E AQUÁTICOS.	4
FIGURA 2.2 - CLASSIFICAÇÃO GERAL DAS ZONAS HÚMIDAS CONSTRUÍDAS SEGUNDO A VEGETAÇÃO E O ESCOAMENTO.....	6
FIGURA 2.3 - FITO-ETAR COM PLANTAS FIXAS EMERGENTES DE ESCOAMENTO SUB-SUPERFICIAL HORIZONTAL. .....	7
FIGURA 2.4 - FITO-ETAR COM PLANTAS FIXAS EMERGENTES DE ESCOAMENTO SUB-SUPERFICIAL VERTICAL...	7
FIGURA 2.5 - OS PROCESSOS E MECANISMOS ECOLÓGICOS MAIS RELEVANTES EM SISTEMAS DE ESS.....	8
FIGURA 2.6 - GRUPOS DE PLANTAS AQUÁTICAS. ....	11
FIGURA 2.7 - BALANÇO HIDRÁULICO DE UMA FITO-ETAR .....	13
FIGURA 2.8 - BALANÇO DE MASSA APLICADO A UM VOLUME DE CONTROLO GENÉRICO.....	14
FIGURA 2.9- COMPARAÇÃO ENTRE DOIS TIPOS DE REACTOR IDEAL .....	17
FIGURA 3.1 - LOCALIZAÇÃO DA FITO-ETAR .....	21
FIGURA 3.2 - PERCURSO DAS ÁGUAS RESIDUAIS DENTRO FITO-ETAR DA BARROCA D`ALVA. ....	22
FIGURA 3.3 - CAUDAIS À SAÍDA DA FOSSA SÉPTICA APÓS BOMBAGEM DE AGUAS RESIDUAIS DA ESTAÇÃO ELEVATÓRIA .....	23
FIGURA 3.4 - PORMENOR DA SAÍDA DO SISTEMA DE “BY-PASS” .....	23
FIGURA 3.5 - MANUTENÇÃO DAS TUBAGENS DE ENTRADA DE AFLUENTE NO LEITO E PORMENOR DA PERFURAÇÃO DA TUBAGEM. ....	23
FIGURA 4.1 - ASPECTO DAS ALTERAÇÕES EFECTUADAS NO SISTEMA DA FITO-ETAR. ....	24
FIGURA 4.2 - POSIÇÕES DOS PIEZÓMETROS NO LEITO 5 E ASPECTO DOS PIEZÓMETROS COLOCADOS. ....	25
FIGURA 4.3 - LOCAIS DE AMOSTRAGEM DE MEIO/SOLO E PLANTAS NO LEITO 5. ....	27
FIGURA 4.4 - ESMAGAMENTO EM ALMOFARIZ.....	29
FIGURA 5.1 - APARÊNCIA DAS AMOSTRAS RECOLHIDAS .....	31
FIGURA 5.2 - CAUDAIS AFLUENTES E EFLUENTES DO LEITO 5.....	32
FIGURA 5.3 - PERCENTAGEM DE REDUÇÃO DO CAUDAL EFLUENTE EM RELAÇÃO AO CAUDAL AFLUENTE.....	32
FIGURA 5.4 - NÍVEL PIEZOMÉTRICO REGISTADO TEMPORALMENTE, EM RELAÇÃO A UMA COTA DE REFERÊNCIA. .....	33
FIGURA 5.5 - NÍVEL REGISTADO ESPACIALMENTE NOS TRÊS PIEZÓMETROS PARA SEIS DIAS.....	33
FIGURA 5.6 - ALTURAS REAIS DO ENCHIMENTO NO LEITO 5.....	34
FIGURA 5.7 - VOLUMES HÍDRICOS DO LEITO 5. ....	34
FIGURA 5.8 - EVAPOTRANSPIRAÇÃO DIÁRIA .....	35
FIGURA 5.9 – VALORES DE EVAPOTRANSPIRAÇÃO ADOPTADOS .....	36
FIGURA 5.10 - TEMPERATURA DO AR REGISTADA NO PERÍODO DE ANÁLISE.....	36
FIGURA 5.11 - EVAPORAÇÃO DE PICHE .....	37
FIGURA 5.12 - HORAS DE SOL DIÁRIAS .....	37
FIGURA 5.13 - CONCENTRAÇÃO DE BROMETOS PRESENTE NO EFLUENTE, AO LONGO DO TEMPO, RECOLHIDO ÀS 8 E 9 HORAS.....	38
FIGURA 5.14 - MASSA DE BROMETOS ACUMULADA AO LONGO DA EXPERIMENTAÇÃO.....	38
FIGURA 5.15 - MASSA DE BROMETOS EMITIDA DIARIAMENTE NO EFLUENTE .....	39
FIGURA 5.16 - MASSA ESPECÍFICA, CAUDAL EFLUENTE E MASSA DE BROMETOS NUM PERÍODO DE DOZE HORAS. .....	39
FIGURA 5.17- DISTRIBUIÇÃO DE BROMETOS NA BIOMASSA, NO EFLUENTE E NA SOLUÇÃO DO SOLO.....	40
FIGURA 5.18 - DISTRIBUIÇÃO DE BROMETOS NAS PLANTAS.....	41
FIGURA 5.19 - NÍVEL DE BROMETOS REGISTADOS PARA OS DIFERENTES ÓRGÃOS DAS PLANTAS ( <i>PHRAGMITES</i> <i>AUSTRALIS</i> ) .....	41



FIGURA 5.20 - NÍVEL DE BROMETOS NAS DIFERENTES PROFUNDIDADES NOS DIVERSOS LOCAIS DE AMOSTRAGEM .....	41
FIGURA 5.21 - MATÉRIA ORGÂNICA DO MEIO DE ENCHIMENTO.....	43
FIGURA 5.22 - TEMPO CARACTERÍSTICO PARA A CURVA DO TRAÇADOR À SAÍDA DO LEITO 5.....	44
FIGURA 6.1 - REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DOS FLUXOS. ....	45
FIGURA 6.2 - SIMULAÇÃO PARA ESCOAMENTO DO TIPO PISTÃO.....	46
FIGURA 6.3 - SIMULAÇÃO PARA ESCOAMENTO DE MISTURA COMPLETA.....	47
FIGURA 6.4 - SIMULAÇÃO PARA ESCOAMENTO DE MISTURA COMPLETA COM DIVERSAS CAMADAS. ....	47
FIGURA 6.5 – RESPOSTA SIMULADA DO MODELO ELABORADO.....	49

## ÍNDICE DE QUADROS

QUADRO 1 - VALORES MÉDIOS DE EFICIÊNCIAS DE REMOÇÃO OBTIDOS POR TRATAMENTO DE ÁGUAS RESIDUAIS ATRAVÉS DE SISTEMAS BASEADOS EM LEITOS DE MACRÓFITOS CONSTRUÍDOS, PARA OS PARÂMETROS FÍSICO-QUÍMICOS E MICROBIOLÓGICOS.....	9
QUADRO 2 - ALGUNS MECANISMOS DE REMOÇÃO EM FITO-ETAR.....	9
QUADRO 3 - CRITÉRIOS PARA SELECIONAR AS ESPÉCIES A UTILIZAR NAS FITO-ETAR.....	12
QUADRO 4 - TIPOS DE MODELOS MATEMÁTICOS EXISTENTES.....	20
QUADRO 5 - PARÂMETROS ANALISADOS, REGISTRADOS E AFERIDOS PREVIAMENTE À INJEÇÃO DO TRAÇADOR.....	25
QUADRO 6 - AMOSTRAGENS E REGISTOS REALIZADOS APÓS A INJEÇÃO DO TRAÇADOR.....	26
QUADRO 7 - CURVA DE CALIBRAÇÃO .....	28
QUADRO 8 - MATERIAL UTILIZADO NAS RECOLHAS DE AMOSTRAS. ....	29
QUADRO 9 - VALORES MÁXIMOS DE DESCARGA PERMITIDOS POR LEI. ....	30
QUADRO 10 - RESULTADOS DAS DETERMINAÇÕES DAS ANÁLISES EFECTUADAS.....	31
QUADRO 11- REGISTOS DE PRECIPITAÇÃO.....	38

## ÍNDICE DE ANEXOS

QUADRO 12- CAUDAIS AFLUENTES E EFLUENTES DO SISTEMA .....	XI
QUADRO 13 - PROFUNDIDADE DO NÍVEL PIEZOMÉTRICO EM RELAÇÃO À COTA DO ENCHIMENTO E NÍVEL PIEZOMÉTRICO EM RELAÇÃO À SOLEIRA DO LEITO 5 .....	XIII
QUADRO 14 - VOLUMES OCUPADOS PELO ENCHIMENTO E PELO FLUIDO AO NÍVEL PIEZOMÉTRICO. ....	XV
QUADRO 15 - MASSA ESPECÍFICA, DIÁRIA E ACUMULADA DE IÕES BROMETO. ....	XVII
QUADRO 16 - MASSA DE IÕES BROMETO EXTRAÍDA DA SOLUÇÃO DO SOLO A DIFERENTES PROFUNDIDADES. ....	XVIII
QUADRO 17 - MASSA DE IÕES BROMETOS ENCONTRADA PARA AS DIFERENTES PARTES CONSTITUINTES DOS MACRÓFITOS RECOLHIDOS. ....	XIX
QUADRO 18 - MATÉRIA ORGÂNICA EXISTENTE NO LEITO 5 A DIFERENTES PROFUNDIDADES. ....	XX

## LISTA DE ABREVIATURAS

Abreviatura	Descrição	Dimensões
CBO <sub>5</sub>	Carência bioquímica em oxigênio ao fim de 5 dias	M L <sup>-3</sup>
CQO	Carência química e oxigênio	M L <sup>-3</sup>
SST	Sólidos suspensos totais	M L <sup>-3</sup>
ETAR	Estação de tratamento de águas residuais	
PE	População equivalente	
Q	Caudal	L <sup>3</sup> T <sup>-1</sup>
C <sub>in</sub>	Concentração à entrada	M L <sup>-3</sup>
C <sub>out</sub>	Concentração à saída	M L <sup>-3</sup>
C <sub>res.</sub>	Concentração residente	M L <sup>-3</sup>
H	Profundidade do leito	L
n	Porosidade do leito	L <sup>3</sup> L <sup>-3</sup>
Q <sub>out</sub>	Caudal de saída	L <sup>3</sup> T <sup>-1</sup>
Q <sub>in</sub>	Caudal de entrada	L <sup>3</sup> T <sup>-1</sup>
Q <sub>ET</sub>	Caudal/Fluxo de evapotranspiração	L <sup>3</sup> T <sup>-1</sup>
P	Precipitação	L <sup>3</sup> T <sup>-1</sup>
I	Infiltração	L <sup>3</sup> T <sup>-1</sup>
EP	Evaporação	L <sup>3</sup> T <sup>-1</sup>
ET	Evapotranspiração	L <sup>3</sup> T <sup>-1</sup>
N	Velocidade de escoamento	L T <sup>-1</sup>
K	Condutividade hidráulica saturada	L T <sup>-1</sup>
TRH	Tempo de retenção hidráulico	T <sup>-1</sup>
EPA	Environment protection agency	
ESS	Escoamento sub-superficial	
ESSH	Escoamento sub-superficial horizontal	
ESSV	Escoamento sub-superficial vertical	
MAOTDR	Ministério do Ambiente, do Ordenamento do Território e do Desenvolvimento Regional	
IA	Instituto da Água	
PFR	“Plug Flow Reactor” (modelo de fluxo pistão)	
CSTR	“Continuously Stirred Tank Reactor” (modelo de mistura completa)	

*“Os problemas com que nos deparamos hoje, não podem ser resolvidos com o mesmo pensamento que, em primeira instância, ajudou a criar esses mesmos problemas”*

Albert Einstein, 1879-1955.

## 1. INTRODUÇÃO

### 1.1. A DINÂMICA DA ÁGUA

Vivemos num planeta coberto de água, onde, mais de 97% é salgada e cerca de 2% está retida sob a forma de neve e gelo, deixando pouco menos de 1% de água doce disponível para todas as formas de vida existentes. Do ponto de vista antrópico esta diminuta quantidade de água doce gera dois tipos divergentes de pressão, sobre a sua quantidade e qualidade; a **pressão demográfica** que actua sobre duas vertentes diferentes mas contíguas, o aumento bruto das populações e o aumento dos consumos nas populações com rendimentos crescentes; as **alterações climáticas** que consistem em pressões mais imprevisíveis e complexas, perturbando, entre outros aspectos, os ciclos hidrológicos que consequentemente afectam também a qualidade e quantidade de água disponível (World Wild Life, 2008)(Soromenho-Marques, 2010).

A degradação da qualidade da água está associada a razões de origem natural (e.g. características morfológicas e geoquímicas do solo ou erosão) e a razões de origem antrópica (e.g. actividades domésticas, industriais e agrícolas) que podem, no seu conjunto ou individualmente, inviabilizar os diversos usos da água. Do ponto de vista antrópico, uma das principais fontes de deterioração dos meios hídricos são as descargas de águas residuais domésticas dado que retiram a pureza e qualidade originais da água, tornando-a inadequada a determinados usos (Oliveira, 2008).

A resolução dos problemas de poluição gerados pela descarga de águas residuais domésticas incide no seu tratamento antes mesmo de serem depositadas nos meios hídricos (como rios, mares ou lagos) de modo a diminuir ou anular a quantidade de substâncias que poderão ser prejudiciais. Contudo o controle da poluição tem custos variáveis, consoante os meios tecnológicos aplicados e o grau de controlo que se pretende mas, geralmente, é efectuado através da instalação de ETAR que promovem o tratamento removendo diversas substâncias poluentes, de forma a produzir águas tratadas com características que assegurem a qualidade dos meios receptores, tendo em conta os respectivos usos actuais e potenciais (Mendes, et al., 2004) (Infopédia, 2006) (Galvão, 2009).

### 1.2. O TRATAMENTO DAS ÁGUAS RESIDUAIS NO PANORAMA NACIONAL

Presentemente a gestão urbana encontra-se intrinsecamente associada ao conceito de desenvolvimento sustentável. No seguimento da aplicação deste conceito nas políticas e acções dos diversos países no mundo, surgiram outras concepções acerca da construção urbana, como o de eco-urbanismo, que tenta apresentar uma proposta multidisciplinar com o objectivo de minimizar o impacto ambiental do urbanismo, maximizando assim a qualidade de vida. Uma das áreas abrangidas pelo eco-urbanismo diz respeito ao saneamento das águas residuais (Carmona, 2009) .

Em Portugal, nas últimas 7 décadas, a tendência de construção em meios urbanos de estações para o tratamento de águas residuais, privilegia estruturas que necessitam quer na sua construção, quer na operação/manutenção, níveis de energia e mão-de-obra com custos significativos para as entidades que os operam (Campos Oliveira, 2007).

Tendo em vista a aplicação do Plano Estratégico de Abastecimento de Água e de Saneamento de Águas Residuais (PEAASAR I e II), conjuntamente com o Plano Nacional da Água, promoveu-se a estruturação/reestruturação de todo o sector do abastecimento de água e do saneamento de águas residuais do País. Um dos objectivos principais a realçar, nestas bases estratégicas, foi (MAOTDR, 2000) (Instituto da Água, 2004) (MAOTDR, 2007):

- Servir cerca de 95% da população total do País com sistema públicos de abastecimento de água e servir cerca de 90% da população total do País com sistema público de saneamentos de águas residuais urbanas, sendo que em cada sistema integrado de saneamento o nível de atendimento desejável deve ser de pelo menos 70% da população abrangida. De destacar que, à data do desenvolvimento do PEARSAR II, este objectivo ainda não tinha sido alcançado na totalidade.

No tratamento das águas residuais dos **grandes aglomerados** populacionais (mais de 2000 habitantes equivalentes), as soluções adoptadas passam (como acima referido) pela construção de sistemas de maior complexidade associados, de forma geral, aos grandes centros urbanos, otimizando assim os custos e os benefícios inerentes a este tipo de estruturas.

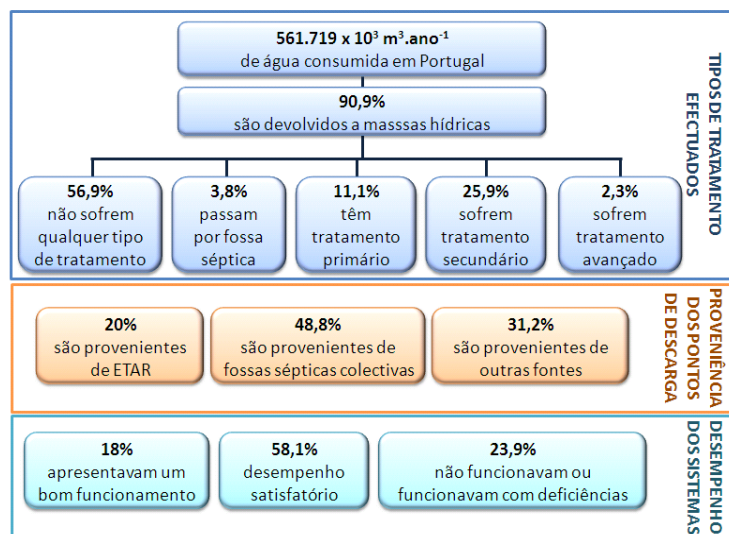
Porém, para satisfazer os objectivos referidos nos PEAASAR I e II, tornou-se necessário aumentar a abrangência dos sistemas de tratamento, também, para **pequenos aglomerados** populacionais (menos de 2000 habitantes equivalentes - Figura 1.1) com carácter geograficamente mais disperso, recursos humanos e financeiros reduzidos, grande variabilidade de caudais e de cargas poluentes, elevada beleza paisagística e de qualidade dos meios receptores (Matos, et al., 2003).



**Figura 1.1** - População residente por município em Portugal no ano de 2009. (Fonte: (INE, 2010))

O Decreto-Lei nº152/97 estabelece limites máximos de descarga de águas residuais urbanas sujeitas a tratamento secundário, prevendo, para populações inferiores a 2000 habitantes equivalentes o conceito de *tratamento apropriado*, que corresponde ao “tratamento das águas residuais urbanas por qualquer processo e/ou por qualquer sistema de eliminação que, após a descarga, permita que as águas receptoras satisfaçam os objectivos de qualidade que se lhes aplicam”. Embora o conceito de “tratamento apropriado” seja ambíguo, de forma geral, a exigência para pequenos aglomerados incide nos limites de poluentes exigidos para uma ETAR com populações superiores a 2000 habitantes equivalentes (Espírito Santo, 2008).

Processos que usam menos energia e mão-de-obra devem, surgir como alternativas mais atractivas para estas comunidades, constituindo um desafio para os engenheiros a concepção de novos processos de tratamento. As soluções alcançadas devem ser viáveis a nível económico, energético e mesmo ao nível da mão-de-obra especializada necessária (para operação e



**Figura 1.2** - Realidade portuguesa quanto aos tipos de tratamento de águas residuais, a proveniência dos pontos de descarga e do desempenho dos sistemas instalados.

(Fonte: Adaptado de (Oliveira, 2008))

manutenção dos equipamentos), devem ser ainda, tecnicamente robustas e simples. Usualmente, para esta escala de projectos de tratamento, tem-se escolhido opções que apresentam custos elevados (lamas activadas, leitos percoladores) ou com eficiências reduzidas (fossas sépticas colectivas). Estes factos, aliados aos restantes já enunciados e ilustrados (Figura 1.2), demonstram a presença de adoptar tipos de tratamento mais sustentáveis, adaptados a cada local específico e

principalmente que assegurem os níveis de tratamento requeridos na legislação (Wallace, et al., 2006) (Seco, et al., 2008) (Galvão, 2009).

A tecnologia das **fito-ETAR** (também denominada de “leitos de macrófitos”, “zonas húmidas construídas” ou “Estação de Tratamento através de Plantas - ETAP”) apresenta-se como uma solução sustentável, para satisfazer os requisitos necessários para o tratamento ao nível biológico de águas residuais de pequenos aglomerados populacionais (Ribeiro, 2007).

### 1.3. OBJECTIVOS DO ESTUDO

A presente dissertação de mestrado tem como objectivo principal o estudo do comportamento hidráulico e ambiental de zonas húmidas construídas, na modalidade de escoamento sub-superficial horizontal.

O estudo teve como objectivos parcelares a análise a partir da recolha de dados de campo, do comportamento hidráulico e ambiental de uma fito-ETAR e o desenvolvimento de um modelo matemático, destinado a traduzir o comportamento hidráulico de zonas húmidas construídas recorrendo a um número reduzido de parâmetros, avaliando e modelando o tempo de retenção hidráulico para um soluto não reactivo.

A realização de estudos de campo (nomeadamente com indicador/traçador de natureza química - Brometo de Potássio; KBr) contribuiu para o conhecimento e percepção do funcionamento e características desta eco-tecnologia, no ambiente para o qual foi idealizada, permitindo ao mesmo tempo a calibração do modelo.

*“A mente que se abre a uma nova ideia jamais voltará ao seu tamanho original.”*  
Albert Einstein, 1879-1955.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1. AS ZONAS HÚMIDAS NATURAIS

As zonas húmidas naturais estão agrupadas em vários tipos sub-ecossistemas, desde massas de água rasas temporárias, margens de lagos, pântanos e pauis, estuários e leitos de cheia de grandes rios, mangues, praias e pântanos salgados do litoral, zonas de água estagnada, recifes de corais e leitos de algas ou de sargaços marinhos. O factor em comum a todos estes agrupamentos é o facto de o solo se encontrar alagado durante uma parte ou na totalidade do ano, promovendo assim condições para o aparecimento de flora totalmente distinta das áreas contíguas (Figura 2.1) (Campos Oliveira, 2007). Um dos principais motivos para essa disparidade ao nível vegetal encontra-se precisamente no facto de o solo permanecer saturado durante os períodos de crescimento vegetal. Este fenómeno origina condições onde o oxigénio é deficiente (condições redutoras), limitando deste modo os tipos de flora adaptada a estas condições. Por sua vez a vegetação mais adaptada vai, por sua vez, criar microambientes na coluna de água, fornecendo superfícies de contacto e ligação para a comunidade microbiana, que quando terminam o seu ciclo de vida criam mais superfícies de contacto e tornam-se fontes adicionais de carbono, azoto e fósforo que catalisam os processos microbiológicos (EPA, 2000).

O escoamento hidráulico nas zonas húmidas naturais é geralmente lento (em parte devido à densidade vegetal) permitindo a deposição de sedimentos e promovendo um maior tempo de contacto entre a água e as várias superfícies existentes nas zonas húmidas naturais. Estas zonas são ainda ricas em microrganismos que transformam e degradam uma enorme variedade de substâncias.



**Figura 2.1** - Posicionamento das zonas húmidas entre os ecossistemas continentais e aquáticos.  
(Adaptado de: (Dias, et al., 2000))

Os meios húmidos naturais proporcionam diversas funções (intrínsecas aos processos que neles ocorrem) e valores (atributos que são percebidos pela sociedade como benéficos). De facto, nem todas as zonas húmidas contribuem com todos os benefícios que serão enumerados a título de



exemplo, mas poderão proporcionar pelo menos alguns deles, dentro de condições apropriadas (Payne, et al.) (Campos Oliveira, 2007):

- **Melhoria da qualidade da água** - Origem de água potável para abastecimento doméstico e para irrigação; filtração de partículas; biodegradação de compostos tóxicos; redução de patogénicos humanos; decomposição e acumulação de metais pesados; tratamento de águas residuais e pluviais.
- **Funções hidrológicas e hidráulicas** - Controlo de erosão e de inundações por cheias; recarga de aquíferos; hidrodinâmica dos leitos de cheia.
- **Efeitos climáticos** - Zonas tampão contra o efeito de aquecimento global; fixação de carbono e equilíbrio de CO<sub>2</sub>; influências no micro-clima.
- **Funções de biodiversidade** - Promoção da vida selvagem; zonas de alimentação para aves, peixes e invertebrados; preservação de material genético; conservação de flora e fauna.
- **Mineração** - Extração de turfa, areia, cascalho.
- **Desenvolvimento de aquacultura e de sistemas integrados** - Pesca, caça, criação de peixes combinada com produção de arroz.
- **Produção de energia** - Hidroelectricidade, energia solar, bombas de calor, combustíveis fósseis.
- **Usos educativos** - Visitas guiadas, estudos naturais, actividades de pesquisa científica
- **Usos recreativos** - Caminhadas, vela, natação, canoagem.

As zonas húmidas de origem natural têm sido utilizadas mundialmente como meio de deposição de águas residuais, contudo, apesar de estas apresentarem uma capacidade depuradora assinalável, muitas entraram em ruptura, quando ultrapassados (em larga escala) os limites máximos que o sistema é naturalmente capaz de processar, incorporando nutrientes em excesso e substâncias poluentes, quer nos sedimentos e/ou metabolizando-os nos próprios organismos vivos, em particular nos vegetais (Alves, 2001).

O conceito das fito-ETAR foi desenvolvido na década de 60 por Käthe Seidel na Alemanha. Seidel projectou o sistema de filtração com material de alta condutividade hidráulica. Entretanto, Reinhold Kickuth, da Universidade de Göttingen, colaborou com Käthe Seidel e desenvolveu posteriormente, na década de 70, um outro sistema de nome, "Método da Zona de Raiz". O sistema de *Kickuth* era diferente do sistema de Seidel na utilização dos solos mais coesos com alto teor de argila. A primeira fito-ETAR implementada de tipo *Kickuth* à escala real foi para o tratamento de esgotos municipais, em 1974, na comunidade Liebenburg-Othfresen (Vymazal, 2005).

As fito-ETAR são, assim, uma tecnologia que pretende reproduzir, num meio semi-controlado, os mecanismos de degradação de poluentes que acontecem nas zonas húmidas naturais. Aproveitando os benefícios destes ecossistemas que, se encontram entre os ecossistemas mais produtivos e com maior diversidade biológica, representando um património natural, cultural e paisagístico único (Alves, 2001) (Ribeiro, 2007)(Campos Oliveira, 2007) (Galvão, 2009).

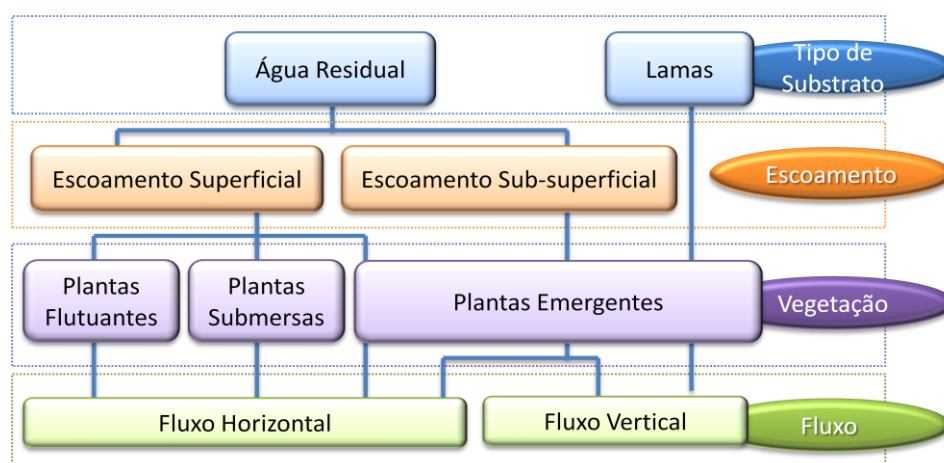
## 2.2. CARACTERIZAÇÃO DAS FITO-ETAR

As fito-ETAR actuais são sistemas biológicos projectados de modo a tirar partido de características específicas das zonas húmidas naturais, com o intuito de melhorar a capacidade de tratamento das águas residuais. São do ponto de vista técnico-económico vantajosas no tratamento de água residual, dado que, necessitam de menores custos ao nível de construção, operação e manutenção (comparando com outras opções de tratamento). Estes sistemas têm capacidade de tolerar flutuações de caudal e finalmente a facilidade que existe em reutilização e reciclagem de água. A sua construção pode ser ainda efectuada de modo a que os leitos se adaptem ao meio circundante, constituindo assim, um habitat para vários seres. As operações de manutenção carecem apenas de intervenções locais periódicas.

Existem diversos tipos de configurações para fito-ETAR, que se podem classificar de acordo com as seguintes características (Oliveira, 2008):

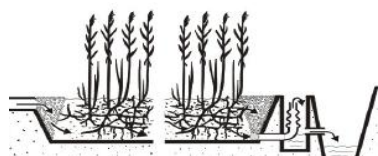
- Macrófitos dominantes (submersa, emergente ou flutuante).
- Configuração dos leitos (sistemas híbridos, de uma passagem ou com recirculação);
- Tipologia de água residual a tratar (doméstica, industrial, agrícola, lixiviados de aterros sanitários, de actividades mineiras e escorrências de rodovias);
- Tratamento exigido (secundário, terciário ou de afinação);
- Meio de enchimento (brita, areia ou areão grosso, seixo rolado, argila expandida ou material sintético);
- Carga (continuo ou descontinuo).

A classificação apresentada na Figura 2.2 fornece uma perspectiva geral dos diversos sistemas existentes de fito-ETAR. Inclui o tipo de substrato que alimenta a fito-ETAR, o padrão de crescimento das espécies botânicas e o tipo de escoamento e de fluxo (Wallace, et al., 2006).



**Figura 2.2** - Classificação geral das zonas húmidas construídas.  
(Fonte: Adaptado de (Wallace, et al., 2006))

Os sistemas de escoamento sub-superficial (ESS) possuem o nível hídrico abaixo da superfície do leito. As vantagens destes sistemas prendem-se com a menor ocorrência de odores e de insectos, com o menor risco de contacto das pessoas com a água residual, uma vez que esta é mantida abaixo da superfície do leito. Dependendo do tipo de alimentação, é possível distinguir-se os sistemas de escoamento sub-superficial horizontal (ESSH) dos de escoamento sub-superficial vertical (ESSV). O sistema ESSH (Figura 2.3) é o mais usual no nosso País e na maioria dos países



**Figura 2.3** - Fito-ETAR com plantas fixas emergentes de escoamento sub-superficial horizontal.

(Fonte: Adaptado de (Ribeiro, 2007))

Europeus e Mediterrânicos. O afluente<sup>1</sup> é distribuído à entrada do leito ao longo de toda a sua largura, deslocando-se horizontalmente, penetrando através do meio poroso e da rizosfera, não existindo, portanto, escoamento superficial. O efluente<sup>2</sup> tratado é recolhido no extremo oposto à entrada, para ser descarregado num destino final.

Nos sistemas do tipo ESSV

(Figura 2.4) existem dois sentidos

de escoamento, o descendente e o ascendente. Nos sistemas descendentes, o afluente passa verticalmente pela superfície do leito, infiltrando-se, até ser recolhida junto à base do leito. Nos sistemas ascendentes o escoamento ocorre por contra-corrente e por capilaridade, normalmente com a utilização de sistemas

mecanizados. A eficiência de remoção de poluentes nestes sistemas depende em larga escala da capacidade de arejamento do solo e das propriedades do material de enchimento (Seco, et al., 2008)(Oliveira, 2008).



**Figura 2.4** - Fito-ETAR com plantas fixas emergentes de escoamento sub-superficial vertical

(Fonte: Adaptado de (Ribeiro, 2007))

### 2.3. COMPONENTES DAS FITO-ETAR: OS SEUS MECANISMOS E PROCESSOS DE REMOÇÃO DE POLUENTES

Estes sistemas de tratamento são, de forma geral, compostos por órgãos de tratamento preliminar (remove os sólidos em suspensão de maior dimensão), tratamento primário (fossa séptica ou tanque de *Imhof*) e tratamento secundário (assegurado por um ou mais leitos de macrófitos) (Seco, et al., 2008).

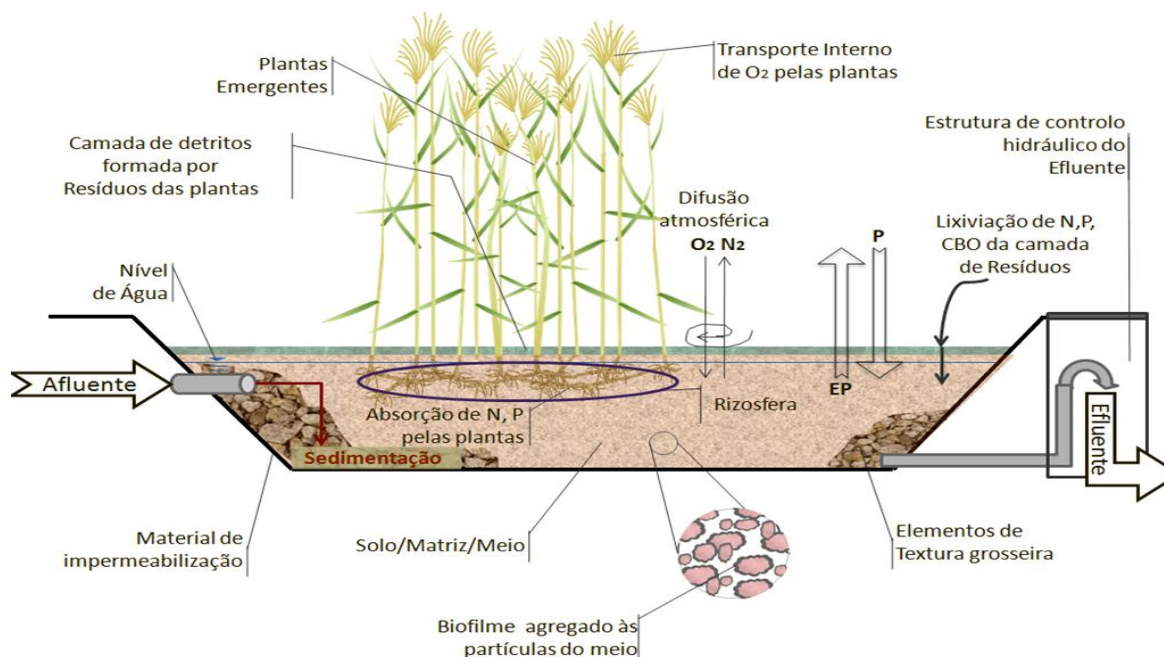
Os leitos das fito-ETAR possuem três componentes principais (Wallace, et al., 2006):

- **A componente fixa** - inclui a matriz/meio/solo, a zona da rizosfera e os **biofilmes** (agregados microbianos que se desenvolvem espontaneamente nas superfícies sólidas em condições fisiológicas adequadas) (Nadell, et al., 2009).
- **A componente hídrica** - abrange o afluente, a água dentro da matriz, o efluente e todos os poluentes associados a estas três vertentes.
- **A componente atmosférica** - regula o movimento dos gases para o interior e exterior da matriz/meio/solo e consequentemente, para a componente hídrica.

<sup>1</sup> Afluente - Água residual que se apresenta à entrada dos leitos de macrófitos para ser depurada.

<sup>2</sup> Efluente - Fluido que se apresenta à saída dos leitos de macrófitos após sofrer o processo de depuração.

Os sistemas de ESS promovem o escoamento do afluente a tratar (idealmente após decantação) através de um meio poroso onde se desenvolvem as plantas aquáticas. As fito-ETAR de sistema com ESS realizam o tratamento das águas residuais afluentes através da remoção de sólidos suspensos, compostos orgânicos, nutrientes (azoto e fósforo), patogénicos (bactérias, parasitas, vírus, etc.) e metais entre os quais metais pesados. Os processos de tratamento nos sistemas ESS, bem como, algumas estruturas de funcionamento, mais relevantes estão ilustrados na Figura 2.5.



**Figura 2.5** - Os processos e mecanismos ecológicos mais relevantes em sistemas de ESS.

(Fonte: Adaptado de (Wallace, et al., 2006))

A transformação e remoção dos poluentes do afluente ocorrem através de numerosos processos inter-relacionados de natureza química (oxidação-redução, precipitação), física (filtração, adsorção; sedimentação; difusão) e biológica, incluindo a biodegradação de compostos orgânicos pelas bactérias, a amonificação-nitrificação-desnitrificação de azoto orgânico, também efectuada por bactérias, a adsorção de fósforo e a libertação de produtos gasosos da decomposição da matéria orgânica para a atmosfera (Quadro 1).

A adsorção do fósforo está dependente do grau de saturação dos locais onde se dá o processo de adsorção, uma vez que, quando esses locais deixam de estar disponíveis, este mecanismo cessa (E.P.A., 2000).

Os elementos solúveis são transformados e removidos maioritariamente por processos que ocorrem na zona da rizosfera e nas superfícies da(o) matriz/meio, assim a remoção dos poluentes solúveis está directamente relacionada com a extensão e tempo de contacto directo entre o afluente e as superfícies reactivas e com as características do escoamento que se desenvolve ao longo dos leitos (Maloszewski, et al., 2006).

A eficiência dos processos de remoção de poluentes que ocorrem nas fito-ETAR é influenciada por uma grande variedade de factores, tais como, as concentrações do afluente a tratar em CBO<sub>5</sub>, CQO e sólidos suspensos, a espessura e porosidade do leito e as espécies de plantas utilizadas, sendo todos estes factores inerentes ao próprio processo de remoção.

**QUADRO 1** - Valores médios de eficiências de remoção obtidos por tratamento de águas residuais através de sistemas baseados em leitos de macrófitos construídos, para os parâmetros físico-químicos e microbiológicos. (Fonte: (Ribeiro, 2007))

Parâmetro	CBO <sub>5</sub>	CQO	SST	Col. Totais	Col. Fecais	Estreptococos	Vírus	E. Coli
<b>Eficiência (%)</b>	77.5	70	80.72	77.76	76	63.80	99	92.5

As fito-ETAR são sistemas heterogêneos e dinâmicos que sofrem flutuações nos parâmetros intrínsecos do processo mas também nos parâmetros ambientais (tais como precipitação, vento, exposição solar ou formação de gelo), quer a curto prazo, quer a longo prazo. Como exemplo dessa heterogeneidade, apresentam-se as condições de oxidação-redução existentes nos leitos, as fases anaeróbias e aeróbias que mudam num curto espaço de tempo (ocorrência e intensidade de precipitação), flutuações que são mais intensas na camada mais superficial dos leitos. Outra fonte importante de variação espacial e temporal dos parâmetros ambientais é a vegetação (Truu, et al., 2009).

As plantas podem modificar activamente as propriedades do meio na zona da rizosfera através da libertação de oxigénio e da exsudação de compostos orgânicos de baixo peso molecular (Alves, 2009).

**Quadro 2** - Alguns mecanismos de remoção em fito-ETAR. (Fonte: Adaptado de (Wallace, et al., 2006))

PARÂMETRO	MECANISMOS FÍSICOS	MECANISMOS QUÍMICOS	MECANISMOS BIOLÓGICOS
<b>Sólidos Suspensos</b>	Sedimentação	-----	Degradação microbiana
<b>CBO<sub>5</sub></b>	Sedimentação	-----	Degradação microbiana
<b>CQO</b>	Sedimentação	-----	Degradação microbiana
<b>Metais</b>	Sedimentação	Precipitação; Adsorção; Troca iónica	Captação pelos microorganismos; Captação pelas plantas
<b>Hidrocarbonetos de petróleo</b>	Volatilização	Adsorção	Degradação microbiana; Captação pelas plantas
<b>Hidrocarbonetos sintéticos</b>	Sedimentação; Volatilização	Adsorção; Volatilização (NH <sub>4</sub> )	Degradação microbiana; Captação pelas plantas
<b>Compostos azotados</b>	Sedimentação	Precipitação; Adsorção	Captação e transformação pelos microorganismos; Captação pelas plantas
<b>Fósforo orgânico e inorgânico</b>	Sedimentação	-----	Captação pelos microorganismos; Captação pelas plantas
<b>Organismos patogénicos</b>	Sedimentação	-----	Mortalidade natural; predação microbiana

É na associação entre fluido, matriz, plantas, detritos de plantas, invertebrados e também microrganismos que se encontra o cerne do conceito desta eco-tecnologia.

### 2.3.1. MATRIZ/MEIO DE ENCHIMENTO

O meio de enchimento é, normalmente, constituído por (Oliveira, 2008):

- Material natural - gravilha ou mesmo solo arenoso, areia ou areão grosso e seixo rolado
- Reciclado - geopolímeros e compósitos de argila expandida e lamas residuais
- Sintético - poliestireno

As partículas de maior dimensão produzem enchimentos com maior **condutividade hidráulica** (traduz a maior ou menor facilidade com que a água se desloca através da matriz) e porosidade, contudo possuem menor área específica para a fixação dos biofilmes. O inverso ocorre com partículas de menores dimensões. A importância da uniformidade prende-se com o facto das partículas menores preencherem os poros que se encontram nos interstícios das maiores (Wallace, et al., 2006).

A condutividade hidráulica do enchimento depende ainda da quantidade de água que nele existe. Assim, será mais baixa na superfície onde o enchimento se encontra mais seco (os espaços intersticiais ficam preenchidos com ar que impede o movimento da água) e aumenta rapidamente em profundidade.

O enchimento é especialmente relevante na remoção de sólidos em suspensão e de microrganismos patogénicos, sendo que, para que a remoção aconteça deve utilizar-se um meio com baixa granulometria, pois, os leitos mais finos permitem uma maior eliminação de microrganismos e uma melhor absorção dos nutrientes, contudo exigem áreas mais extensas. Antagonicamente, os leitos mais permeáveis, (gravilha ou areão) são relativamente menos eficazes no desenvolvimento das plantas e na remoção de poluentes e microrganismos, no entanto permitem a aplicação de cargas hidráulicas mais elevadas e oferecem menores riscos de colmatção.

A **colmatção** é um fenómeno que ocorre devido à acumulação de afluente à superfície do leito, consequência do encharcamento e escoamento superficial devido à diminuição de porosidade, quer pela natureza do próprio enchimento, quer pela sua diminuição natural ao longo do tempo.

Um meio muito permeável admitirá cargas hidráulicas mais elevadas e estará menos sujeito a colmatção, em contrapartida, assegurará condições menos adequadas de filtração e retenção, ou eliminação de microrganismos patogénicos podendo, adicionalmente, originar um menor desenvolvimento das macrófitas (Oliveira, 2008).

A condutividade hidráulica ao longo do tempo de operação altera-se, devido ao desenvolvimento dos rizomas e das raízes, pela formação de precipitados e pela acumulação de partículas contidas nas águas residuais afluentes.

Nas fito-ETAR o fundo e os taludes - estruturas geralmente elaboradas com uma geometria trapezoidal, já que esta é mais estável e acessível em termos de construção - devem ser estanques/impermeabilizados de modo a impedir a contaminação dos solos e recursos hídricos subterrâneos e a assegurar a retenção de água necessária à manutenção da vegetação. Para o efeito pode recorrer-se a membranas de polietileno de alta densidade - PEAD, bentonites ou argilas compactadas (Wallace, et al., 2006).

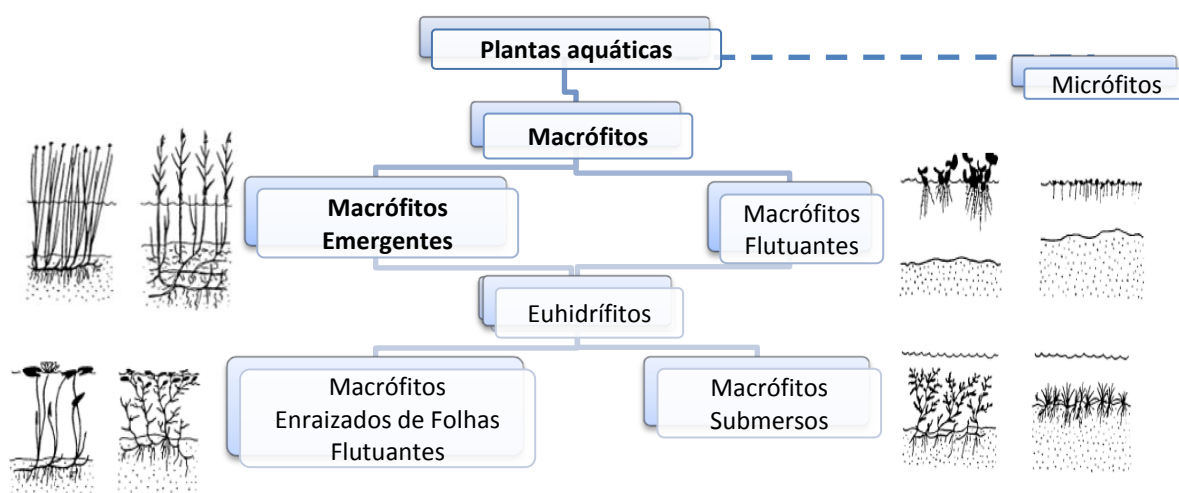


## 2.3.2. ESPÉCIES BOTÂNICAS

Designam-se por plantas aquáticas as espécies botânicas que têm o seu ciclo de vida ligado à água ou a ambientes encharcados/húmidos.

É comum a divisão das plantas aquáticas em micrófitos (plantas microscópicas, como as microalgas que constituem o *fitoplâncton* e o *perifiton*), e macrófitos (plantas macroscópicas, incluindo macroalgas, briófitos, pteridófitos e espermatófitos).

O termo **macrófito** (do grego macro-grande + phyton-plantas) refere-se à generalidade das plantas macroscópicas, contudo na prática é aplicado quase exclusivamente para as plantas aquáticas, razão pela qual se usa macrófito e não macrófito aquático. Uma vez que a raiz grega *phyton* é masculina, utiliza-se a palavra macrófito no masculino (Catarino, et al., 2001).



**Figura 2.6** - Grupos de plantas aquáticas.  
(Fonte: Adaptado de (Catarino, et al., 2001)(Lesage, 2006))

São usadas nas fito-ETAR para tratamento de águas residuais uma grande variedade de plantas, as mais frequentes são plantas dos géneros *Typhas*, *Phragmites*, *Juncus* e *Scirpus* sendo as *Phragmites* as mais utilizadas na Europa pelas suas características de desenvolvimento, crescimento e adaptação.

Os macrófitos a implementar devem ser plantas que existam já nas imediações do local, tornando assim a adaptação mais rápida e eficaz. Devem ter também uma elevada capacidade de evapotranspiração, boa tolerância a águas salobras e elevado teor em azoto (propriedades características de uma água residual à saída das fossas sépticas) (Quadro 3). O fenómeno da evapotranspiração, que está directamente relacionada com o vento e a exposição solar, contribui significativamente para redução do volume de água no leito (para determinadas condições a redução pode ser superior a 80%, entre a entrada e a saída), tendo ainda um efeito benéfico nas taxas de remoção e no desempenho do sistema em geral (Canais Seco, 2008).

As raízes/rizomas das diversas espécies botânicas coabitam na matriz das fito-ETAR com uma elevada variedade de microorganismos, que usam os diversos substratos para adquirirem carbono, nutrientes e energia para as suas actividades de crescimento e manutenção, sendo

responsáveis pela degradação dos poluentes orgânicos e inorgânicos. Parte dos microorganismos responsáveis pela transformação de substratos está presente no biofilme que se desenvolve nas raízes/rizomas das plantas ou nas partículas de meio de enchimento (Dias, et al., 2000) (Wallace, et al., 2006).

Mesmo águas residuais saturadas de poluentes fosfatados (e.g. provenientes das máquinas de lavar) são tratadas pelas plantas que também se alimentam dos fosfatos contidos nestes afluentes (Canais Seco, 2008).

**Quadro 3** - Critérios para seleccionar as espécies a utilizar nas fito-ETAR.  
(Fonte: Adaptado de (Canais Seco, 2008))

<p><b>Resumo dos aspectos já descritos, para seleccionar as espécies mais adequadas à depuração em fito-ETAR:</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Que sejam de crescimento rápido;</li> <li>▪ Para leitos de alturas superiores a 0.6 m deve optar-se por <i>Phragmites</i>, cujas raízes conseguem atingir profundidades da ordem dos 1 m;</li> <li>▪ Sempre que os afluentes possam apresentar altos teores de sódio, como é o caso das águas residuais em povoações do litoral onde podem ocorrer infiltrações de águas salobras, é recomendável a utilização de caniços como "<i>Phragmites australis</i>" ou "<i>Phragmites vulgaris</i>";</li> <li>▪ Que as raízes se desenvolvam e cresçam rapidamente, pois normalmente este crescimento está relacionado com a presença de nutrientes, crescendo em profundidade à medida que estes vão diminuindo;</li> <li>▪ Que tenham um elevado rendimento na depuração das águas residuais e na eliminação de nutrientes;</li> <li>▪ Que tenham uma utilidade posterior, como forragem de currais ou incorporação na compostagem de detritos vegetais;</li> <li>▪ Que sejam de fácil controlo;</li> <li>▪ Que sejam resistentes à salinidade presente nas águas residuais, que varia ao longo do processo de tratamento devido às reacções que vão ocorrendo.</li> </ul>
---	--

Os principais mecanismos por detrás do sucesso dos macrófitos na depuração de águas residuais são a fitoestabilização, a rizodegradação, a fitodegradação, a fitoacumulação, a fitovolatilização e finalmente a evapotranspiração (Pereira, 2010).

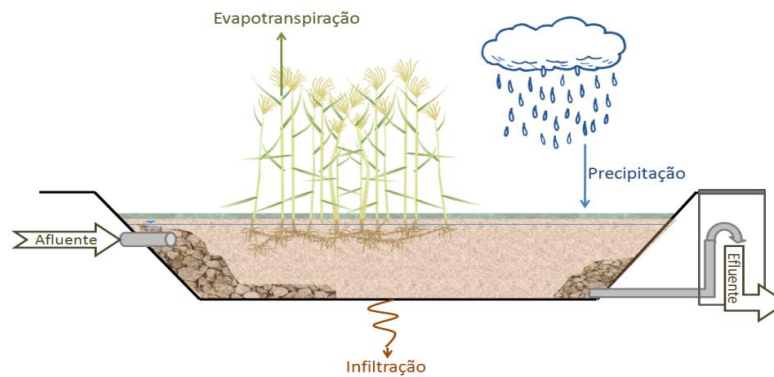
## 2.4. COMPORTAMENTO HIDRÁULICO DAS FITO-ETAR

### 2.4.1. BALANÇO HIDRÁULICO

O conhecimento do comportamento hidráulico e do balanço hidráulico de uma fito-ETAR para que se possa avaliar a sua eficiência de depuração é fundamental.

Para a realização do balanço hidráulico (Figura 2.7) é necessário conhecer os processos de transporte e de retenção de água no meio. Estes são muito complexos, uma vez que a superfície do sistema está continuamente exposta a fluxos de energia que criam ciclos de temperatura, humidade relativa, evaporação e até fluxos de vapor de água causados por gradientes de temperatura (Cameira, 1999).





**Figura 2.7** - Balanço hidráulico de uma fito-ETAR  
(Fonte: Adaptado de (Wallace, et al., 2006))

(Equação 2. 1.)

$\Delta V$  - armazenamento no interior do leito [ $L^3T^{-1}$ ];

$Q_{in}$  - caudal afluente ao leito [ $L^3T^{-1}$ ];

$Q_{out}$  - caudal efluente do leito [ $L^3T^{-1}$ ];

$P$  - precipitação sobre o leito [ $L^3T^{-1}$ ];

$ET$  - evapotranspiração no leito [ $L^3T^{-1}$ ];

$I$  - infiltração no fundo do leito [ $L^3T^{-1}$ ].

A **infiltração** tem um valor, geralmente, nulo uma vez que representa uma saída de água que ocorre somente se o leito não se encontrar impermeabilizado.

Sistemas de tratamento para águas residuais como as fito-ETAR podem ser, compostos por estações elevatórias e órgãos de tratamento primário (fossa séptica ou tanque de *Imhof*), facto que atenua os efeitos dos caudais de ponta afluentes ao sistema. As pontas de caudal se forem muito elevadas podem reduzir o tempo de retenção hidráulico comprometendo a eficiência do tratamento (Seco, et al., 2008) (Galvão, 2009).

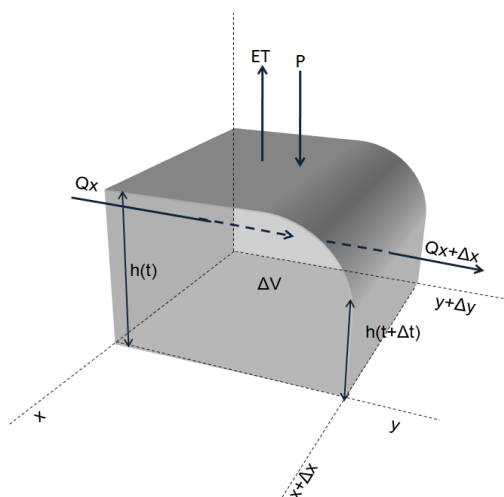
A **precipitação** sobre uma fito-ETAR promove a diluição da concentração dos contaminantes, uma vez que aumenta o volume (e consequentemente o nível freático) de água no leito, contudo não diminui a sua massa. Se os eventos de precipitação forem muito intensos, o caudal à saída do leito poderá apresentar igualmente um aumento significativo, à medida que escoar o volume extra recebido. Segundo (Wallace, et al., 2006) cerca de 58% a 65% do volume dos leitos é ocupado pelo material de enchimento, sendo assim, existe um volume limitado para armazenamento dos eventos de precipitação abaixo da superfície dos leitos. Para contornar esta limitação é costume elevar as margens dos leitos de modo a que a superfície do leito se encontre abaixo da superfície do restante terreno.

A **evapotranspiração** é a perda combinada de água resultante da evaporação (do solo) e da transpiração das plantas. A evapotranspiração segue um ciclo diário alcançando um valor máximo ao início da tarde e um mínimo durante a noite. Este fenómeno pode contribuir para reduzir drasticamente o volume de água no leito (Canais Seco, 2008).

#### 2.4.2. CARACTERÍSTICAS DO ESCOAMENTO

As equações que traduzem o escoamento no interior das fito-ETAR baseiam-se nas leis do escoamento em meios porosos, em que no caso destes sistemas, se aplica um balanço de massa a um volume de controlo com uma lei de resistência ao escoamento (isto é, a subtracção do volume que sai e das perdas à soma do volume que entra com os ganhos). Para aplicar as leis de escoamento em meios porosos às fito-ETAR são necessárias as seguintes premissas - as acelerações verticais são desprezadas; a distribuição de pressões na vertical toma-se como hidrostática; considera-se que a deposição e a erosão não influenciam o escoamento e finalmente o fluido é homogéneo, isotrópico e incompressível (Espírito Santo, 2008).

Admitindo que os ganhos e perdas para o exterior se efectuam unicamente na superfície livre do volume de controlo então de forma genérica o balanço de massa será o indicado na Figura 2.8.



Sendo;

$h$  – altura da superfície livre [L];

$\Delta V$  – volume armazenado [ $L^3$ ];

$ET$  – (perda) evapotranspiração [ $LT^{-1}$ ];

$P$  – (ganho) precipitação [ $LT^{-1}$ ];

$Q_x$  – caudal no ponto  $x$ , na direcção  $x$  [ $L^3T^{-1}$ ].

**Figura 2.8** - Balanço de massa aplicado a um volume de controlo genérico.

(fonte: adaptado de (Galvão, 2009))

O balanço da Figura 2.8 num determinado intervalo de tempo  $\Delta t$ , para as parcelas correspondentes ao volume de entrada, volume de saída, perdas e ganhos, pode ser expresso pelas seguintes equações:

■

(Equação 2.2.)

■

(Equação 2.3.)

■

(Equação 2.4.)

■

(Equação 2.5.)

■

(Equação 2.6.)

$n$  – Porosidade do meio de enchimento [ $L^3/L^3$ ]

Admitindo que não há fluxos laterais e que o sistema é homogêneo a equação pode ser expressa por unidade de largura do leito:

■

(Equação 2.7.)

$q$  - Caudal por unidade de largura [ $L^2T^{-1}$ ]

Como,

■

(Equação 2.8.)

Então a equação (2.8.):

■

(Equação 2.9.)

■ ——— ———

(Equação 2.10.)

A expressão que traduz o escoamento nas fito-ETAR longitudinalmente pode ser obtida combinando a equação da continuidade (2.10.) com uma lei de resistência ao escoamento (equação de fluxo).

Tomando como pressuposto a hipótese de Dupuit (numa dada secção, o escoamento é horizontal - a distribuição de velocidades é uniforme e finalmente o gradiente hidráulico coincide com o desnível da superfície livre). A Lei de Darcy traduz-se na expressão seguinte:

■

(Equação 2.11.)

- Velocidade do escoamento [ $LT^{-1}$ ]

$J$  - Perda de carga unitária

$K$  - Condutividade hidráulica [ $LT^{-1}$ ]

A Hipótese de Dupuit aplicada à Lei de Darcy toma o seguinte aspecto:

$$v = \frac{K}{\mu} \frac{dH}{dx}$$

(Equação 2.12.)

- Velocidade do escoamento [ $LT^{-1}$ ]

K - Condutividade hidráulica [ $LT^{-1}$ ]

H - Cota da superfície livre relativamente a um plano horizontal de referência [L]

Dado que:

$$v = \frac{K}{\mu} \frac{dH}{dx}$$

(Equação 2.13.)

- Velocidade do escoamento [ $LT^{-1}$ ]

S - área transversal [ $L^2$ ]

Ajustando a equação (2.12.) à equação (2.10.) virá:

$$v = \frac{K}{\mu} \frac{dH}{dx}$$

(Equação 2.14.)

Rearranjando a equação (2.14.) vem:

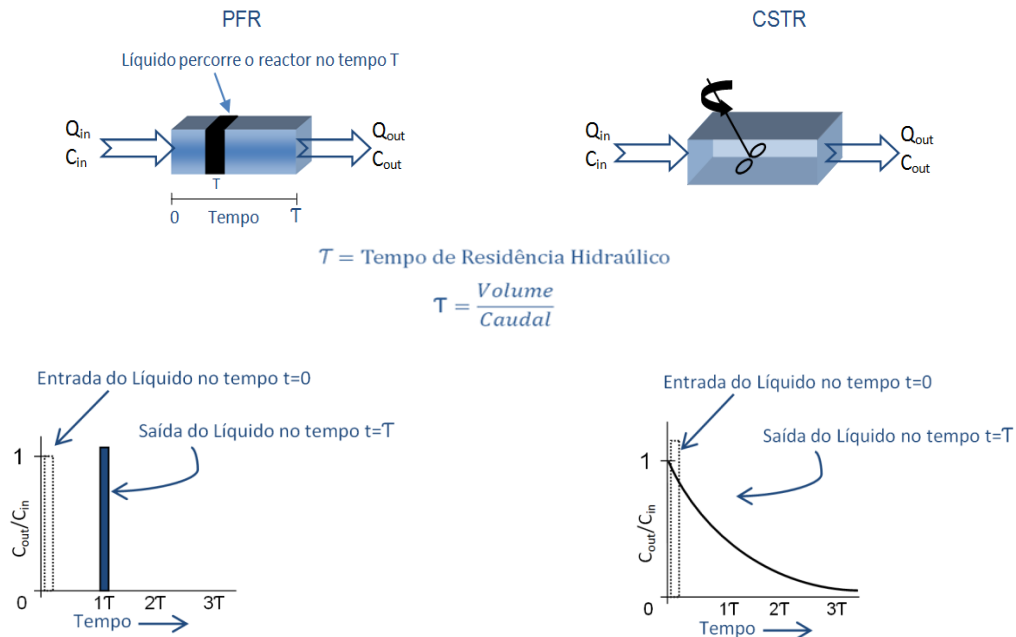
$$v = \frac{K}{\mu} \frac{dH}{dx}$$

(Equação 2.15.)

Esta é a equação aplicada ao escoamento unidimensional num meio poroso segundo a direcção xx que ocorre nas fito-ETAR com sistema ESSH.

Nos últimos vinte anos foram publicados inúmeros artigos acerca de fito-ETAR de ESSH, facto que gerou uma elevada produção de dados acerca da redução de poluentes nestes sistemas, contudo, existe ainda uma área em que esses dados são diminutos, o comportamento hidráulico (García, et al., 2004).

As fito-ETAR podem ser entendidas como um reactor biológico. Os reactores biológicos obedecem a diferentes modelos de escoamento hidráulicos, o *modelo de fluxo pistão* (PFR), onde a difusão lateral e a mistura são nulos, sendo que determinada massa do líquido passa através do reactor sem que ocorram processos de mistura no seu percurso, o *modelo de mistura completa* (CSTR) em que o conteúdo do reactor é homogéneo e igual à concentração do efluente, finalmente, o *modelo de escoamento disperso*, tendo este um comportamento misto entre o de fluxo pistão e mistura completa (Oliveira., 1995).



**Figura 2.9** - Comparação entre dois tipos de reator ideal  
(Fonte: Adaptado de (Wallace, et al., 2006))

As curvas de efluência dos reactores indicam-nos os tempos de retenção de diferentes fracções de soluto. O tempo de retenção hidráulico para um reator é calculado através da expressão:

$$\frac{n V}{Q} = TRH$$

(Equação 2.16.)

Esta expressão não representa, forçosamente, o tempo de retenção real, dado que se assume que o escoamento é do tipo pistão.

Uma vez que o escoamento do interior de uma fito-ETAR não se comporta como num reator ideal, esse escoamento “não ideal” pode ser conhecido através da injeção, no caudal afluente, de um traçador inerte de massa conhecida. O método do traçador por impulsos é geralmente usado para a determinação das características do escoamento em reactores não ideais (Chazarenc, et al., 2003).

A função de distribuição do tempo de retenção (RTD), que representa o tempo que diversas fracções do fluido permanecem no interior do leito, é obtida a partir da curva de efluência do traçador.

$$\frac{Q(t)C(t)}{\int_0^\infty Q(t)C(t)dt} = RTD$$

(Equação 2.17.)

O tempo de retenção médio do traçador TRT pode ser calculado pela expressão:

(Equação 2.18.)

O tempo de retenção da mediana do traçador  $TR_{50}$ , representa o tempo que, 50% da massa de traçador, demora a sair do sistema e pode ser calculado pela seguinte expressão:

$C_0$  - Concentração inicial de traçador [ $ML^{-3}$ ]

(Equação 2.19.)

## 2.5. TRAÇADOR: IÃO BROMETO

Um traçador é uma substância química que deve apresentar as seguintes características para ser eficiente na sua função (Veríssimo, 1997):

- Não deve ser significativamente adsorvido ou retido no solo por qualquer outro processo.
- Deve ser “exótico” no ambiente do estudo, ou seja, não existir em quantidades mensuráveis.
- Deve ser de carácter conservativo não devendo degradar-se química ou biologicamente, de modo significativo.

Os iões brometo ( $Br^-$ ) e os iões cloreto ( $Cl^-$ ) são dos traçadores mais utilizados em diversos estudos ambientais, incluindo em estudos sobre fito-ETAR, para caracterizar o movimento de água e de solutos, uma vez que, são apontados como inertes quer do ponto de vista químico, quer biológico. O brometo apresenta, em relação ao cloreto, a vantagem de a sua concentração natural nos solos e nas águas ser menor, o que permite detectar os movimentos de quantidades muito pequenas deste ião. A utilidade do cloreto é limitada devido à sua ocorrência comum na solução do solo e no afluente (Veríssimo, 1997) (Małoszewski, et al., 2006).

A concentração de Bromo (Br) na crosta terrestre encontra-se entre 0,2 a 1,0 mg/kg, sendo maior em sedimentos argilosos. No solo, o conteúdo do elemento situa-se entre 5 a 40 mg/kg, sendo que as maiores quantidades de bromo são registadas em solos japoneses derivados de cinzas vulcânicas. Poucos compostos de Bromo surgem naturalmente como minerais (por exemplo, brometo de prata, AgBr). É um elemento altamente volátil, sendo que os seus sais, à semelhança dos sais de Cloro, são rapidamente solúveis. A principal fonte antropica de Bromo é a libertação de gases pelos veículos, seguida por fumigantes de solo.

O Bromo é absorvido pelas plantas na forma do ião brometo ( $\text{Br}^-$ ), sendo que a vegetação marinha possui mais Bromo que a terrestre. O teor de Bromo é, normalmente, maior nas folhas do que nas raízes, sendo facilmente solúvel nos tecidos, contudo o método de transporte do Bromo do solo para as plantas não foi ainda descrito (Macêdo, et al., 2008). A certo nível o ião brometo pode substituir parte das necessidades da planta ao nível do ião cloreto, caso haja deficiência deste ião no meio, portanto, o seu excesso é fitotóxico, sendo que os níveis de Bromo nos solos não são muito elevados, assim, a toxicidade não ocorre normalmente. Existem diferenças de sensibilidade ao bromo entre espécies, algumas são mais sensíveis como em plantas ornamentais e outras mais tolerantes (podem apresentar 2 g/kg e não manifestarem sintomas) como cenoura, tabaco e tomateiro (Mengel, et al., 2001).

Os sintomas da toxicidade devida ao ião brometo assemelham-se aos efeitos provocados pelo excesso de sais. As folhas ficam normalmente cloróticas seguida de necrose na bordadura, pelo contrário, algumas plantas parecem ser bastante tolerantes ao ião brometo não apresentando quaisquer sintomas de toxicidade (tomate, tabaco, cenoura) (Quelhas dos Santos, 1996) (Mengel, et al., 2001)

O ião brometo apresenta no entanto uma ressalva ao seu uso indiscriminado em meios naturais, uma vez que, a oxidação do brometo origina o ião hipobromito ( $\text{BrO}^-$ ), que pode transformar-se em bromato ( $\text{BrO}_3^-$ ).

O limite para o bromato em águas destinadas a consumo humano, em Portugal, é de 10  $\mu\text{g/l}$ . A concentração de brometo a partir da qual a formação de bromato se torna crítica é 0,1 mg  $\text{Br}^-/\text{l}$  (Cavalheiro, 2005).

Contudo existem determinadas águas minerais, consumidas um pouco por todo o mundo, que contêm níveis consideráveis de iões brometo sem que com isso se associe a riscos de saúde pública, como a Vichy® (1mg  $\text{Br}^-/\text{l}$ ), Evia® (0,01mg  $\text{Br}^-/\text{l}$ ), Vitel® (0,024mg  $\text{Br}^-/\text{l}$ ). Ocorrem também de forma natural nas águas de regiões como Boulou e Gerona, níveis de brometos na ordem dos 2,18 mg  $\text{Br}^-/\text{l}$  e 2,5 mg  $\text{Br}^-/\text{l}$ , respectivamente (Mendes, et al., 2004).

## 2.6. MODELAÇÃO DO ESCOAMENTO

Um modelo deve representar uma realidade física e será tanto mais viável quanto mais os resultados simulados se aproximarem dos resultados observados (Wang, 2002). Segundo (Galvão, 2009) os modelos existentes aplicados em fito-ETAR pode ser enquadrada na seguinte classificação:

**Quadro 4** - Tipos de modelos matemáticos existentes.  
(Fonte: (Galvão, 2009))

<b>Modelos empíricos</b>	O número de parâmetros intervenientes é reduzido. Entre estes modelos consideram-se as regras empíricas e as equações de regressão.
<b>Modelos semi-empíricos</b>	Fundamentam-se em equações de cinética microbiana (cinética de 1ª ordem e de Monod). O número de parâmetros intervenientes é limitado.
<b>Modelos mecanísticos</b>	Pretendem traduzir quantitativamente a relação entre determinados fenómenos e os princípios que os originam, através da representação de processos físicos, químicos e biológicos. Contemplam geralmente a divisão do leito em diversos elementos, procedendo à simulação dinâmica de diversas variáveis de estado em cada parcela. O número de parâmetros envolvidos é, de uma forma geral, elevado, englobando propriedades do meio de enchimento, constantes associadas às cinéticas de reacções e dados meteorológicos associados ao cálculo de variáveis hidrológicas (designadamente precipitação e evapotranspiração).
<b>Modelos adaptativos</b>	Recorrem à aplicação de redes neuronais para prever as concentrações de um poluente na massa líquida a partir de uma série de registos com pares de valores relativos à entrada/saída, destinados à “aprendizagem” do sistema.

A modelação mecanística para traduzir o comportamento de zonas húmidas construídas tem origens relativamente recentes, tendo os primeiros modelos sido desenvolvidos no final da década de 90.

As implicações em termos de modelação mecanística da aplicação em fito-ETAR reflectem-se na estrutura adoptada para caracterizar a componente de transporte, que se baseia geralmente numa de duas alternativas, designadamente as seguintes:

- Aplicação da equação de convecção-difusão. Casos particulares correspondem a modelos do tipo PFR com dispersão, através da aplicação de diferentes condições-fronteira;
- Aplicação de uma sucessão de reactores de mistura completa.

A maioria dos modelos apresenta uma componente hidráulica relativamente simplificada, sendo no entanto incluídos os fenómenos da evapotranspiração e da precipitação.

O modelo que será apresentado contempla o transporte de uma substância não-reactiva, destinando-se à estimativa do tempo de retenção do traçador no leito.



*“Toda a nossa ciência, comparada com a realidade, é primitiva e infantil - e, no entanto, é a coisa mais preciosa que temos.”*

Albert Einstein. 1879-1955.

### 3. ESTUDOS DE CAMPO EM FITO-ETAR

#### 3.1. DESCRIÇÃO DO LOCAL DE ESTUDO

A localização da fito-ETAR situa-se na povoação de Barroca D`Alva (com características rurais), no concelho de Alcochete, distrito de Setúbal (Figura 3.1).

O sistema analisado foi projectado e executado pela empresa ETARPLAN, S.A. que planifica estruturas para ETAR através de plantas, segundo o sistema Kickuth. O projecto propôs-se servir uma população de 500 habitantes equivalentes com uma capitação diária de 150 l/habitante e um coeficiente de afluência de 0,8, com um caudal médio afluyente à fito-ETAR de  $6,94 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$ . O factor de ponta calculado pela empresa foi de  $f=4,18$  obtendo-se um caudal de ponta instantâneo de  $2,90 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ . O leito onde incidiu a análise mais pormenorizada foi o leito 5 (Figura 3.1).

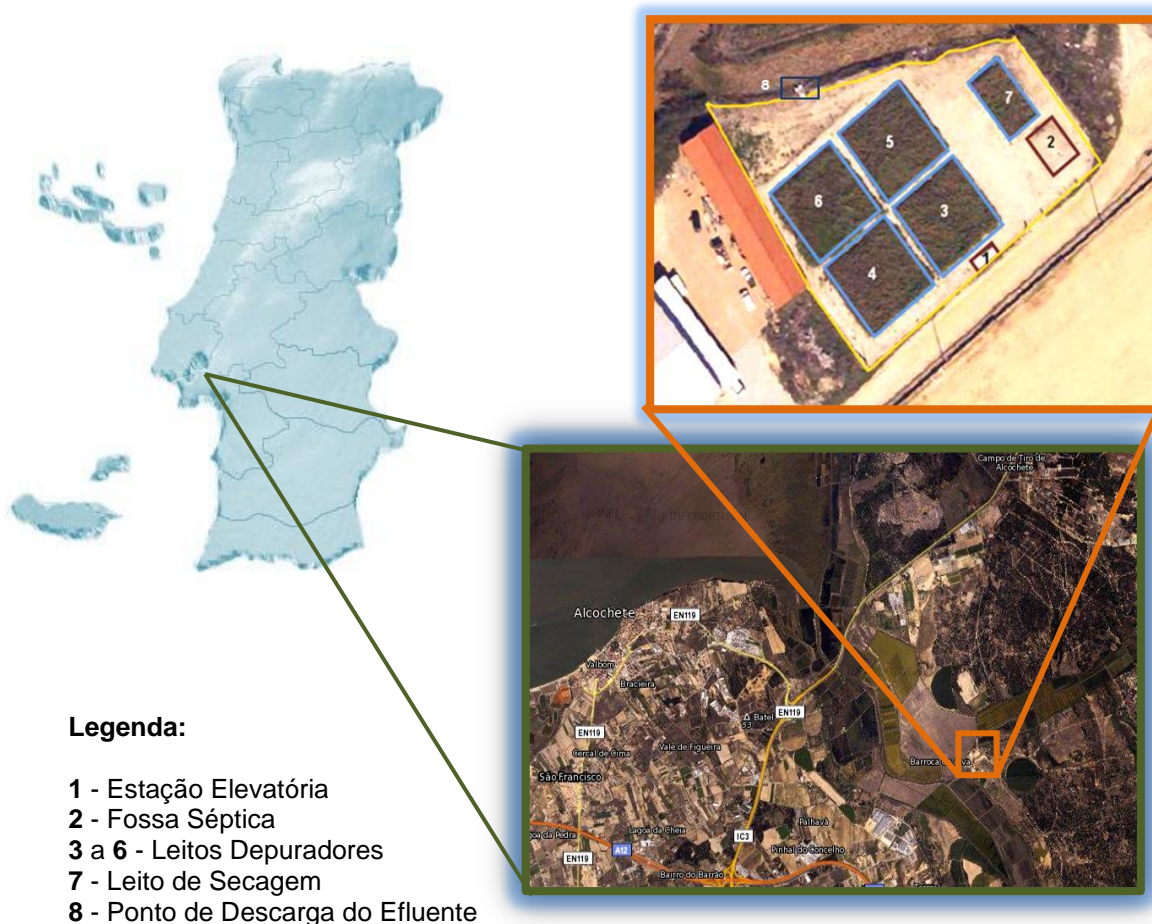


Figura 3.1 - Localização da fito-ETAR  
(Nota: Imagem sem escala)

### 3.2. INSTALAÇÕES E EQUIPAMENTOS EXISTENTES NO LOCAL

A fito-ETAR da Barroca D'Alva ocupa uma área total de 4000 m<sup>2</sup> e está em funcionamento desde 2001, é constituída por uma estação elevatória com sistema de bombagem (electrobomba submersível) precedida por um canal de retenção de areias e tamizador, fossa séptica (órgão de tratamento primário), quatro leitos depuradores de *Kickuth* (onde estão implementadas plantas da espécie *Phragmites Australis* – para tratamento secundário) com ESSH, em que cada leito tem uma área de 441 m<sup>2</sup> e uma altura média (cota superior do substrato até à cota impermeabilizante) de 0,775 m com uma relação comprimento/largura 1:1, finalmente, um leito de secagem de lamas com uma área de 168 m<sup>2</sup> (tripartido) e uma altura de 1,50 m (Figura 3.2).



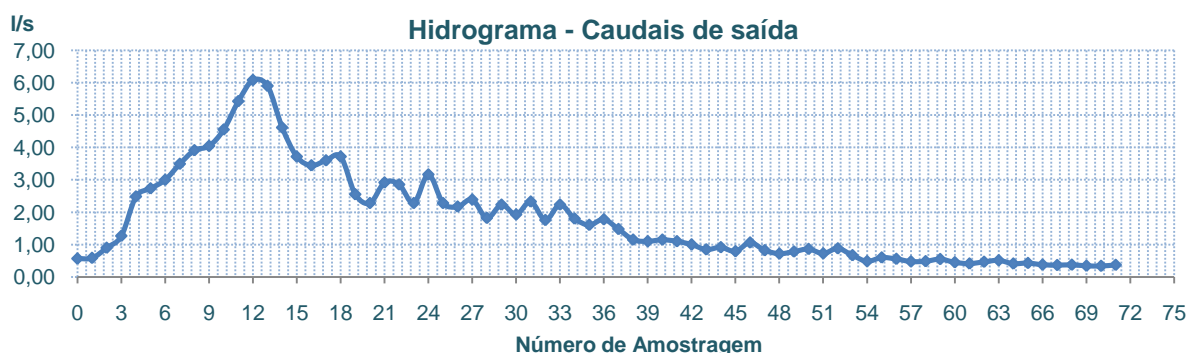
**Figura 3.2** - Percurso das águas residuais dentro fito-ETAR da barroca D'Alva.

Anualmente são realizadas análises microbiológicas e físico-químicas ao efluente. A manutenção da fito-ETAR incide fundamentalmente na limpeza, da grelha de entrada e na desobstrução das tubagens dos leitos (Figura 3.5) efectuada por funcionários da Câmara Municipal de Alcochete.

O sistema de bombagem possui uma capacidade de bombear para o interior da fossa séptica 1,27x10<sup>-2</sup> m<sup>3</sup>/s. A bombagem tem carácter descontínuo, operando através de um sistema bóias de nível que ligam e desligam o motor quando o reservatório da estação elevatória atinge uma altura de

0,54 m, demorando cerca de 66,39 s a bombear um volume de  $0,84 \text{ m}^3$ . O reservatório possui um volume residual de  $0,456 \text{ m}^3$  que permanece após cada período bombagem.

A fossa séptica é um compartimento (dividido em dois) cilíndrico com diâmetro 3,5 m e comprimento de 8,3 m, tendo uma capacidade para 75 000 l ( $75 \text{ m}^3$ ). Está situada acima do nível da superfície do solo e recebe as águas residuais domésticas retendo-as por um dia, segundo informações do projecto de licenciamento da fito-ETAR. A Figura 3.3 mostra o hidrograma dos caudais de saída (aferidos instantaneamente) da fossa séptica, ao longo de 26 minutos após um episódio de bombagem de águas residuais para o interior da fossa séptica.



**Figura 3.3** - Caudais à saída da fossa séptica após bombagem de águas residuais da estação elevatória

Os quatro leitos depuradores são todos impermeabilizados com geomembrana de polietileno de alta densidade. A distribuição do caudal de entrada é efectuada por tubagem perfurada que se encontra a cerca de 0,20 m de profundidade e se estende paralelamente à entrada do leito, a tubagem de recolha do caudal é da mesma natureza, porém situa-se no fundo do leito imediatamente antes da saída. Ambas as tubagens estão envoltas em brita de modo a evitar a penetração das raízes pelos tubos. A regulação dos caudais efluentes é feita através de um sistema de tubagem invertida (sifão) com possibilidade de regulação da altura.



**Figura 3.4** - Pormenor da saída do sistema de "by-pass"

A rede de drenagem da povoação é separativa, contudo, verifica-se a afluência de caudais pluviais ao sistema, este facto traduz-se no aumento de caudal afluente após algum episódio de precipitação. O sistema foi projectado com um sistema de "by-pass" de modo a desviar, para o canal de rega, os caudais afluente ao sistema através da rede de drenagem em situações de emergência.



**Figura 3.5** - Manutenção das tubagens de entrada de afluente no leito e pormenor da perfuração da tubagem.



*“O único lugar onde o sucesso vem antes do trabalho é no dicionário”*

Albert Einstein, 1879-1955.

## 4. MATERIAL E MÉTODOS

### 4.1. PREPARAÇÃO PRÉVIA DO LOCAL DE ESTUDO

Para concretizar os objectivos descritos em 1.3. da presente dissertação, foram necessários alguns trabalhos de limpeza nas estruturas da fito-ETAR de Barroca D`Alva, bem como a colocação de estruturas de modo a permitir o escoamento.

Realizaram-se, então, acções de limpeza em todas as caixas de visita e entrada do afluente e em todas as caixas de saída de efluente afectas ao leito número 5, colocando-se estruturas de elevação do escoamento na caixa de entrada do leito de modo a minimizar o tempo de residência da água dentro da caixa. Na caixa de saída colocaram-se componentes de canalização de modo a que fosse possível recolher amostras de efluente e medições de caudal. Estas acções realizaram-se no período de Verão em que o caudal de efluente era nulo. Procedeu-se posteriormente ao encerramento do leito número 5 (Figura 4.1), vedando a saída de afluente na caixa repartidora de caudais à saída da fossa séptica, bem como, nas caixas que precedem a entrada do leito 5.



**Figura 4.1** - Aspecto das alterações efectuadas no sistema da fito-ETAR.

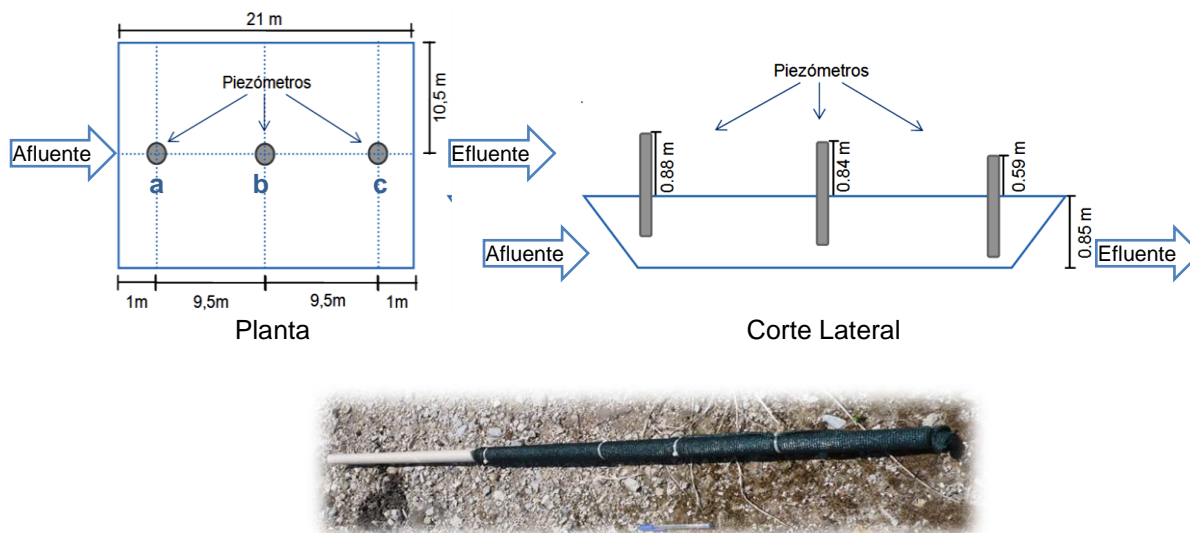
Após as operações descritas anteriormente adaptou-se à torneira de água potável, proveniente do furo existente no local, uma mangueira (30 m comprimento e 15 mm de diâmetro) de modo a que chegasse à caixa de entrada do leito 5. No dia 13 de Julho de 2010 regulou-se o caudal da torneira de modo a estabelecer um regime permanente de escoamento no leito 5.

Estas execuções permitiram a redução do nível de complexidade do sistema, através do controlo dos caudais de entrada de modo a manter a altura piezométrica estável (condições de fronteira), estas execuções garantiram também uma baixa interferência das (diversas) substâncias químicas que o afluente possui que perturbariam a correcta leitura do traçador químico aplicado.

#### 4.2. PROCEDIMENTO DE ANÁLISE DO SISTEMA

Na análise do sistema utilizaram-se três piezómetros com 1,3 m de comprimento para medir a altura de água no leito. Estes foram colocados nas posições indicadas na Figura 4.2.

No mesmo período foram recolhidas - amostras do meio/solo a três alturas (0,2 m; 0,4 m; 0,6 m) e uma amostra de solo composta pela mistura das três alturas, antes da saída do efluente; amostras da água potável; amostras de afluente à saída da fossa séptica, de modo a, aferir o nível de brometos existentes no local antes da injeção do traçador.



**Figura 4.2** - Posições dos piezómetros no leito 5 e aspecto dos piezómetros colocados.  
(Nota: Imagem sem escala)

Uma vez que, o leito se encontrava com caudal de saída nulo houve um tempo de espera de (cerca de 4 dias) entre a abertura da torneira com um caudal de  $3,11 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$  e o aparecimento de caudal de saída suficiente para iniciar as medições.

A partir de dia 16 de Julho de 2010 realizaram-se (entre as 07:00 e a 09:00 horas) amostragens diárias, onde se avaliaram alguns parâmetros, e procedeu-se ao registo dos caudais de entrada e saída.

**Quadro 5** - Parâmetros analisados, registados e aferidos previamente à injeção do traçador.

Dia	Parâmetros							
	Turbidez	pH	Condutividade Eléctrica	CQO	CBO <sub>5</sub>	Caudal Afluente	Caudal Efluente	Brometos
16/07	X	X Y	X Y	X	X	X	X	X Y
17/07	X	X	X	X	X	X	X	X
18/07	X	X	X	X	X	X	X	X
19/07	X	X	X	X	X	X	X	X
20/07	X	X	X	X	X	X	X	X
21/07	X	X	X	X	X	X	X	X
22/07	X	X	X	X	X	X	X	X
23/07	X	X	X	X	X	X	X	X
24/07	X	X	X	X	X	X	X	X
25/07	X	X	X	X	X	X	X	X

X – Parâmetro avaliado para o efluente

Y – Parâmetro avaliado para a água potável

No dia 26 de Julho procedeu-se à injeção do traçador Brometo de Potássio com uma densidade de  $327,01 \text{ kg/m}^3$ , de forma considerada instantânea, uma vez que, foi injectado dentro da tubagem perfurada de distribuição de caudal do leito 5 através de um tubo inserido na tubagem da caixa de entrada. Este traçador foi escolhido devido à proximidade do rio Tejo relativamente à fito-ETAR, onde as águas têm um carácter salobro inviabilizando o uso do ião cloreto para o estudo (ponto 2.5 da presente dissertação). A partir de dia 26 os parâmetros e registos amostrados passaram a ter uma periodicidade diferente. Contudo os parâmetros sobre os quais recaiu a análise foram apenas: caudal afluente, caudal efluente, altura de água no leito e Brometos.

A alteração da periodicidade da amostragem foi modificada uma vez que se quis aferir a resposta dos diversos parâmetros quer a nível diário, quer a nível horário. O Quadro 6 apresenta os dias das amostragens bem como o registo das horas.

**Quadro 6** - Amostragens e registos realizados após a injeção do traçador

Horas Dias	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
26/07																		X	X	X				
27/07						X	X	X	Y	X	X	X	X	X	X	X	X							
28/07				X	X	X	X	X	Y	X	X	X				X	X	X						
29/07							X	X	Y	X	X	X	X	X	X	X	X	X						
30/07						X	X	X	Y	X	X	X	X	X	X	X	X							
31/07			X	X	X	X	X	X	Y	X	X	X	X	X	X									
1/08						X	X	X	Y	X	X	X	X	X										
2/08		X	X	X	X	X	X	X	Y	X	X	X	X											
3/08									YZ															
4/08									YW															
5/08									YW															
6/08									YW															
7/08 a 17/09								X	Y															

X - Registo do caudal efluente e recolha de amostra de efluente de hora a hora.

Y - Registo do caudal efluente, afluente e altura de água no leito; recolha de amostra do efluente de hora a hora.

Z - Registo do caudal efluente, afluente; recolha de amostra do efluente de 30 em 30 minutos.

W - Registo do caudal efluente, afluente; recolha de amostra do efluente de 10 em 10 minutos.

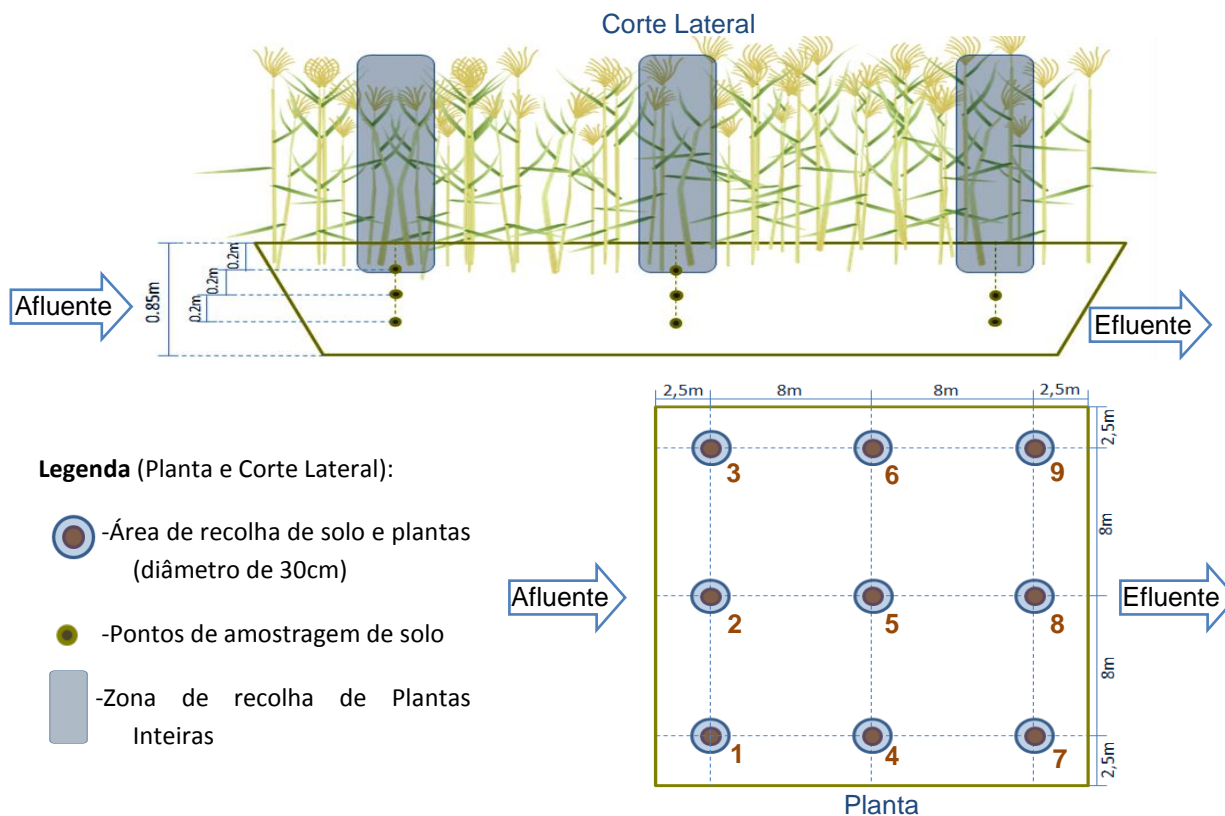
No período de 17/09 a 30/09 foram realizadas 4 amostragens (dias 20, 23, 27 e 30 de Setembro), uma vez que, para esse tempo os níveis dos parâmetros (principalmente os iões brometos) de análise se mantiveram estáveis e pouco acima dos níveis naturais que ocorrem no sistema.

No dia 30 de Setembro de 2010 cessaram as recolhas das amostras de efluente e o registo dos caudais. Nessa mesma data recolheram-se no campo amostras de solo e plantas no leito 5, realizaram-se 9 furos através de uma sonda com um diâmetro de sensivelmente 0,15 m onde se recolheram amostras consecutivas a cada 0,2 m até chegar aos 0,6 m em redor desses furos foram retiradas plantas conforme ilustra a Figura 4.3.

Nos últimos três furos (7, 8 e 9) não se procedeu à recolha de amostras de solo a 0,2 m, dado que, o fluido não alcançou essa altura, no decorrer do estudo.

Efectuou-se também, a recolha de plantas inteiras dos restantes leitos depuradores (3, 4, 6 – Figura 3.1), sendo que esta foi realizada próximo das caixas de entrada de cada leito, formando apenas uma amostra composta dos três leitos.

Procedeu-se ainda à recolha de biomassa em três cubos feitos no leito 5 com  $8,0 \times 10^{-3} \text{ m}^3$  de volume, de forma a calcular uma estimativa da biomassa total do leito.



**Figura 4.3** - Locais de amostragem de meio/solo e plantas no leito 5.  
(Nota: Imagem sem escala)

Uma vez que, durante a maior parte do tempo da análise do sistema a fito-ETAR esteve a operar com um sistema de bombagem alternativo, devido a avaria do sistema habitual, apenas foi aferido o caudal à saída da fossa séptica quando o sistema ficou de novo a operar nas perfeitas condições, no final do mês de Setembro.

Foi efectuado um levantamento topográfico do leito 5 através de um nível.

#### 4.2.1. METODOLOGIAS DE ANÁLISE DAS AMOSTRAS RECOLHIDAS

As amostras recolhidas no campo foram analisadas através de diversos métodos, consoante a natureza da amostra e do parâmetro a analisar.

##### ▪ Turbidez

A turbidez das amostras de efluente recolhido foi aferida num turbidímetro pelo método nefelométrico (2130 B) descrito em (APHA; AWWA; WEF, 1998).

##### ▪ pH

O pH foi medido pelo método 4500-H<sup>+</sup> B descrito em (APHA; AWWA; WEF, 1998) através de um potenciómetro.

### ▪ Condutividade eléctrica

A condutividade eléctrica foi avaliada num condutivímetro electrónico (método 2510 B) relatado em (APHA; AWWA; WEF, 1998).

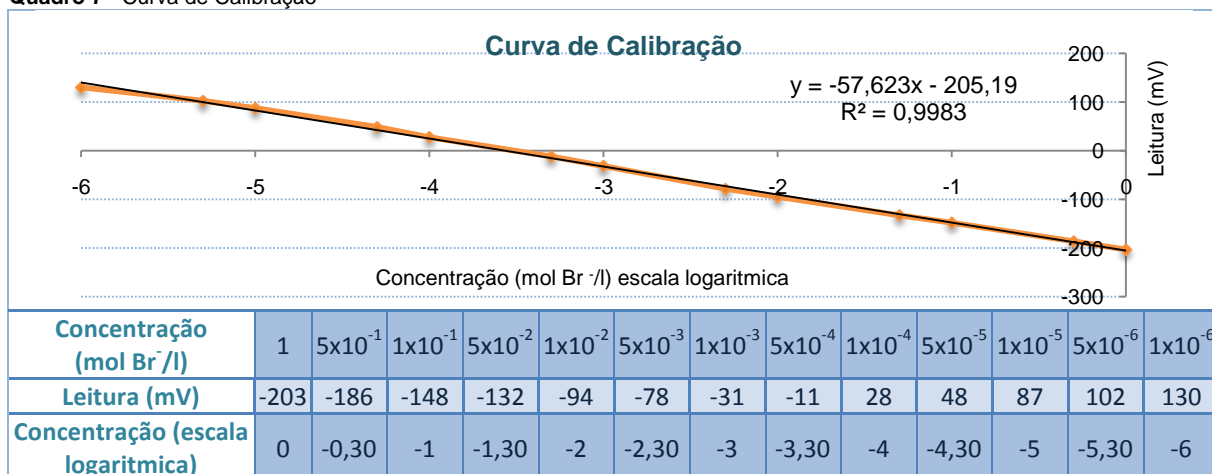
### ▪ CQO e CBO<sub>5</sub>

Para a carência química de oxigénio utilizou-se o método colorimétrico “*closed reflux*” em kits (5220 D), na carência bioquímica de oxigénio recorreu-se ao método respirométrico (5210 D), ambos descritos em (APHA; AWWA; WEF, 1998).

### ▪ Iões Brometo

Os iões brometo foram aferidos pelo método do eléctrodo selectivo de iões (método potenciométrico) descrito na totalidade, incluindo as características do aparelho de leitura, por (Veríssimo, 1997). A técnica consiste, de forma geral, na introdução de um eléctrodo formado por um sensor que, quando mergulhado numa solução contendo iões, fornece um potencial que depende da quantidade de iões livres na solução. Tendo por base a técnica potenciométrica, determina-se um parâmetro químico (concentração iónica) através da avaliação de uma propriedade física (potencial), recorrendo a uma curva de calibração que relaciona as duas grandezas e é construída utilizando padrões de concentração conhecida, traçada em escala logarítmica e formato digital (Quadro 7)(Simões, 2008).

Quadro 7 - Curva de Calibração



### ▪ Textura do Enchimento/Solo

A análise textural do solo foi efectuada pelo método da pipeta (CSSS, 1993) para as fracções limo e argila, por sedimentação e decantação para a areia fina e por crivagem para a areia grossa. A amostra foi dispersa com hexametáfosfato de sódio e carbonato de sódio por agitação em 16 horas.

### ▪ Extracção da Solução de Solo

A extracção da solução do solo foi efectuada através do método da proporção fixa descrita em (CSSS, 1993).



### ▪ Extracção de iões brometo nas plantas

Uma vez que, não foi encontrada bibliografia para este tipo de extracção (iões brometo em plantas) o método utilizado baseou-se na seguinte premissa - a encontrar iões brometo na estrutura das plantas seria nos vacúolos das mesmas, assim sendo, procedeu-se do seguinte modo:

- Separou-se as diferentes partes das plantas recolhidas (raiz, caules; folhas e inflorescências) e secou-se cada parte a 30° em estufa por quatro dias.
- Procedeu-se á moagem do material seco a 30° para uma granulometria de 200 mm.
- Realizou-se o esmagamento em almofariz – conforme Figura 4.4 (2 g de amostra seca a 30°, para 25 ml de água desionizada nas raízes caules e folhas, e 30 ml de água desionizada para as inflorescências e finalmente 2 g de areia do mar lavada).
- Procedeu-se à filtração da solução durante quatro horas com papel de filtro de 150 mm
- Preparou-se a amostra obtida, para ser lida no aparelho do ião selectivo de Br<sup>-</sup> descrito por (Veríssimo, 1997).



Figura 4.4 - Esmagamento em almofariz

### ▪ Determinação da matéria seca (solo/plantas), matéria orgânica e densidade aparente do solo

Depois de todas as amostras (solo e plantas) serem secas a uma temperatura de 30°C por quatro dias, pesaram-se porções das amostras para cadinhos de pesos determinados e colocaram-se na estufa a 105°C durante 48 horas. No final do tempo decorrido retiraram-se da estufa para um excicador até alcançar a temperatura ambiente e realizaram-se novas pesagens dos cadinhos, de modo a fazer a extrapolação para o peso seco total da cada amostra inicial.

Em relação à matéria orgânica do solo utilizou-se a metodologia descrita por (Varenes, 2003). A densidade foi determinada pelo “Core Method” descrito por (CSSS, 1993).

O material necessário para todas as metodologias referenciadas encontra-se descrito na bibliografia referida. Far-se-á apenas o registo do material utilizado nas recolhas de material no campo conforme o que se encontra descrito no Quadro 8.

Quadro 8 - Material utilizado nas recolhas de amostras.

	Natureza da amostra			
	Efluente	Solo	Plantas	Geral
Material	Frascos de plástico de 100 ml e de 1l	Sonda	Sacos plásticos	Cronómetro
	Máscara	Sacos plásticos	Sachola	Fita métrica
	Luvas descartáveis	Pá	Luvas descartáveis	Faca
	Copo volumétrico de 1l	Sacho	-	Tesoura
	Balde graduado de 24l	Luvas descartáveis	-	Papel absorvente

“Quem nunca errou nunca experimentou nada novo.”

Albert Einstein, 1879-1955.

## 5. RESULTADOS OBTIDOS E SUA DISCUSSÃO

### 5.1. CARACTERIZAÇÃO DO MEIO DE ENCHIMENTO

O meio de enchimento desta fito-ETAR, as suas propriedades e características são específicos de um sistema *Kickuth*, ou seja, constitui uma componente patenteada destes sistemas implementados pela empresa ETARPLAN S.A. não existindo informação acerca do mesmo, contudo, para levar a cabo os objectivos do presente trabalho, realizaram-se algumas análises em que se obtiveram as seguintes resultados referentes à análise textural:

- Areia grossa - 71,67%
- Areia fina - 20,76%
- Limo - 5,81%
- Argila - 1,75%
- Capacidade de Troca Catiónica - 3-5 cmol/Kg
- Porosidade Média Teórica - 0,45 m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>

Através destes resultados e pelo diagrama triangular, a textura deste meio/solo é arenosa. A análise da memória descritiva e justificativa do projecto de licenciamento revela que o volume total de enchimento com estas características é de 313,60 m<sup>3</sup> (numa altura média de 0.78 m) e que a sua **condutividade hidráulica** terá o valor de 43,2 m/dia. Realizando a extrapolação do volume total de poros para o volume total de substrato teremos uma área útil de vazios de 140,52 m<sup>3</sup>.

### 5.2. RESULTADOS DAS ANALISES LABORATORIAIS PRÉ-INJEÇÃO DO TRAÇADOR

As análises realizadas ao efluente iniciaram-se no dia da primeira saída de efluente do leito 5 e surgiram para caracterizar a evolução do mesmo, depois da introdução de água potável no sistema. Podemos referir que todos os parâmetros analisados nos dias 16 a 25 de Julho tiveram, de forma geral, um decréscimo ao longo do tempo com excepção do pH e do nível de brometos que se mantiveram. Quanto ao parâmetro CQO o seu valor encontrou-se sempre abaixo dos limites de descarga permitidos por lei. Já os valores de CBO<sub>5</sub> situaram-se acima dos valores permitidos desde dia 16 até dia 19 de Julho (Quadro 9).

**Quadro 9** - Valores máximos de descarga permitidos por lei.  
(Fonte: (Levy, 2008))

Parâmetros	Decreto-Lei n.º 152/97 (Águas Residuais Urbanas)
CBO <sub>5</sub>	25 mg/L O <sub>2</sub>
CQO	125 mg/L O <sub>2</sub>

Os resultados das análises e avaliações foram os apresentados no Quadro 10.

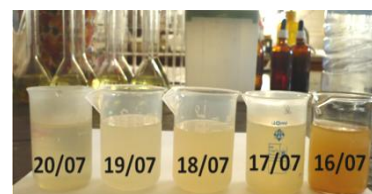
**Quadro 10** - Resultados das determinações das análises efectuadas.

Dia	Parâmetros							
	Turbidez (NTU)	pH	Condutividade Eléctrica	CQO (mg/L O <sub>2</sub> )	CBO <sub>5</sub> (mg/L O <sub>2</sub> )	Caudal Afluente m <sup>3</sup> /s	Caudal Efluente m <sup>3</sup> /s	Brometos (kg Br <sup>-</sup> /m <sup>3</sup> )
16/07	845,3	7,15	2,23 mS/cm	77,3 <sup>1</sup>	80	7,67x10 <sup>-5</sup>	3,86E-05	1,01x10 <sup>-3</sup>
17/07	110,3	6,51	2,09 mS/cm	74,8 <sup>1</sup>	77	8,22x10 <sup>-5</sup>	2,53E-05	1,05x10 <sup>-3</sup>
18/07	129,1	6,61	2,10 mS/cm	29,7 <sup>1</sup>	31	8,33x10 <sup>-5</sup>	3,75E-05	1,20x10 <sup>-3</sup>
19/07	29,8	6,55	2,01 mS/cm	44,9 <sup>1</sup>	46	8,25x10 <sup>-5</sup>	4,58E-05	1,24x10 <sup>-3</sup>
20/07	65,5	6,77	1,92 mS/cm	17,5 <sup>1</sup>	18	8,14x10 <sup>-5</sup>	4,44E-05	9,70 x10 <sup>-4</sup>
21/07	74,5	6,42	1,83 mS/cm	14,4 <sup>1</sup>	15	8,28x10 <sup>-5</sup>	4,64E-05	1,24x10 <sup>-3</sup>
22/07	32,3	6,51	1,68 mS/cm	19,6 <sup>1</sup>	20	7,22x10 <sup>-5</sup>	4,42E-05	1,10x10 <sup>-3</sup>
23/07	67,2	6,46	1,48 mS/cm	9,5 <sup>1</sup>	10	7,78x10 <sup>-5</sup>	4,39E-05	9,70x10 <sup>-4</sup>
24/07	43,5	6,58	1,53 mS/cm	2,2 <sup>1</sup>	2	7,69x10 <sup>-5</sup>	3,44E-05	9,70x10 <sup>-4</sup>
25/07	75,2	6,78	1,49 mS/cm	4,7 <sup>1</sup>	5	7,42x10 <sup>-5</sup>	2,72E-05	9,40x10 <sup>-4</sup>

Nota: Os valores do quadro assinalados a laranja foram aferidos a partir do valor de CQO analisado, com a percentagem referente à medição real do dia 16/07.

<sup>1</sup> Estes valores poderão estar subestimados no que se refere ao parâmetro CQO, uma vez que, foram medidos pelo método "closed reflux" em kits para uma gama mais elevada.

Dos parâmetros avaliados referentes ao efluente os mais assinaláveis ao nível de análises elaboradas são os caudais e os brometos, dado que os outros parâmetros apresentam valores esperados para um efluente com um crescente factor de diluição devido ao caudal de entrada (como se pode verificar visualmente pela aparência das amostras na Figura 5.1). Os caudais efluentes sofrem nesta fase inicial uma redução de 49% em relação aos caudais de entrada, permitindo afirmar através do balanço hidráulico, abordado no ponto 2.4.1. do presente trabalho que o restante volume se encontra armazenado no interior do leito ou abandonou do sistema através do fenómeno da evapotranspiração.



**Figura 5.1** - Aparência das amostras recolhidas

O nível de brometos determinado, permitiu aferir o nível natural de brometos existentes no leito 5 nas condições criadas para o estudo (caudal permanente de água potável), que tem o valor médio,  $1,07 \times 10^{-3} \text{ Kg Br}^{-}/\text{m}^3$ .

Realizou-se também a determinação da concentração de brometos nas águas residuais à saída da fossa séptica ( $1,20 \times 10^{-3} \text{ kg Br}^{-}/\text{m}^3$ ), este valor permite registar que as condições criadas para a injeção dos brometos (caudal permanente de água potável) reduziram apenas em 11% o nível de iões brometo registados à saída da fossa séptica. Ao alterar a natureza do afluente do leito 5 (passar de águas residuais a água potável), diminuiu-se o número substâncias interferentes na correcta leitura do potenciómetro específico para brometos sem modificar em grande escala as condições existentes.

### 5.3. VARIAÇÃO DE CAUDAIS E NÍVEL PIEZOMÉTRICO NO LEITO

Os caudais de entrada sofreram algumas variações não programadas (e.g. desregulação do caudal da torneira de água potável causada por motivos incertos, remoção da mangueira de água da caixa de entrada por diversos espaços de tempo), contudo diariamente essas anomalias eram corrigidas e o caudal de entrada era estabilizado, sendo os efeitos destes episódios algo significativos para a análise geral do sistema. As alterações do caudal afluyente, e principalmente do efluente, devem-se principalmente ao fenómeno da transpiração, dado que de toda a água absorvida pelo sistema radicular apenas uma pequena fracção fica retida na planta. A maior parte é evaporada pela parte aérea para o ar circundante (e.g. numa planta de milho, cerca de 98 % da água absorvida é evaporada pela planta, 1,8 % é retida na planta e apenas 0,2 % é utilizada na fotossíntese) e ao fenómeno da evaporação directa do solo (Costa, 2001).

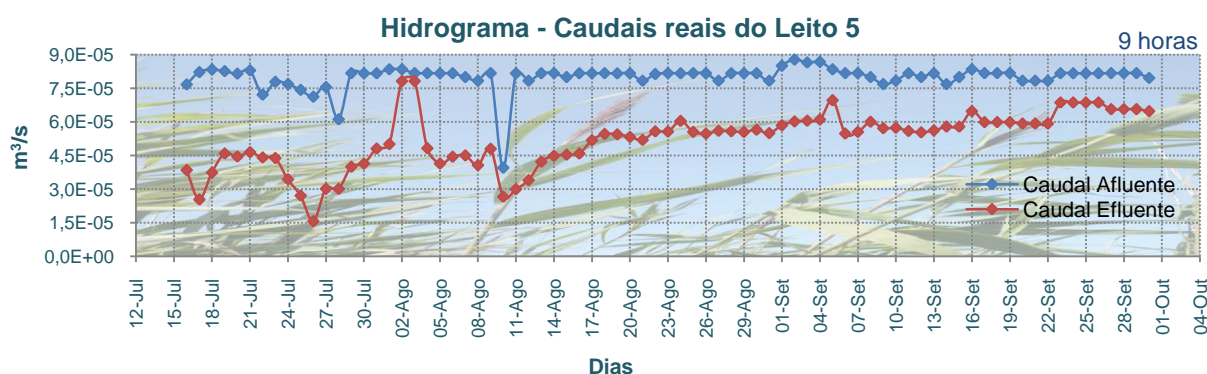


Figura 5.2 - Caudais afluentes e efluentes do leito 5

De forma a tentar alcançar um regime permanente os caudais afluentes ao leito 5 foram regulados de modo a que este recebesse (menos de metade do caudal de projecto –  $1,74 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$ ), em média,  $7,78 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$ , quanto aos caudais efluentes médios situaram-se nos  $5,19 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$ .

O valor médio dos caudais efluentes não manifesta o valor real da diminuição dos caudais afluentes para o efluente que alcançou em algumas ocasiões os 78% de redução (Figura 5.3), facto que corrobora a hipótese do caudal efluente estar directamente relacionado com factores ambientais como a precipitação, temperatura atmosférica, e insolação (ponto 5.5.). Na realidade todos estes factores afectam em larga escala o fenómeno da evapotranspiração, (ponto 5.4) que se encontra directamente relacionado com a variação do volume de água nos leitos e com o caudal efluente.

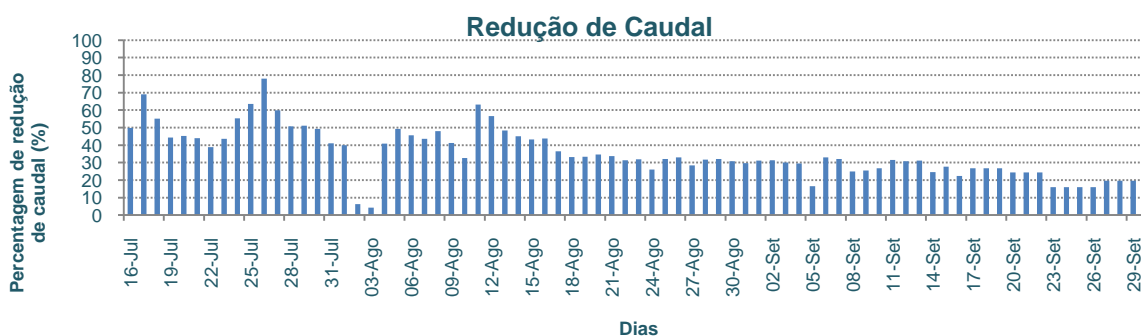
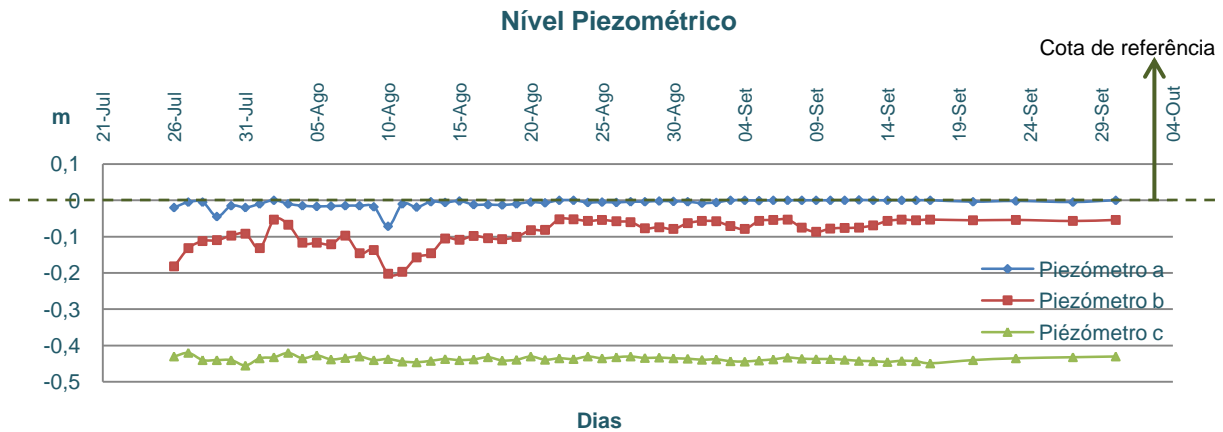


Figura 5.3 - Percentagem de redução do caudal efluente em relação ao caudal afluyente

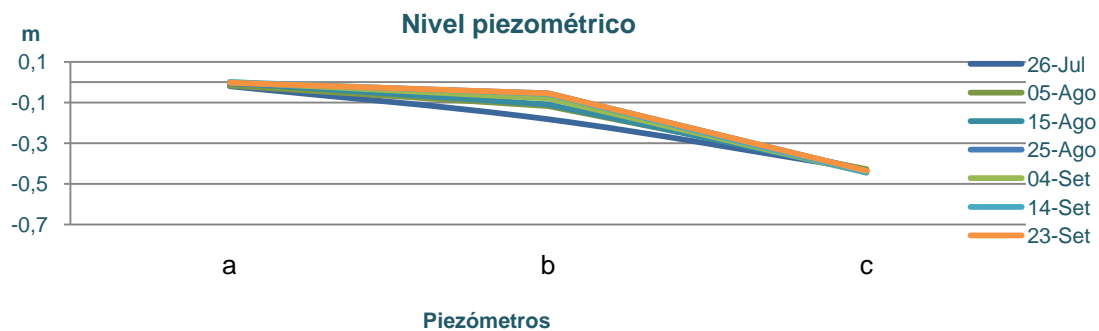
Na totalidade do período decorrido foram necessários cerca de 4 volumes porosos de caudal afluyente para alcançar o nível de iões brometo no efluente atingido.

O nível piezométrico dos leitos foi medido através dos piezómetros (a, b e c) e de forma geral apresentou ao longo do tempo um comportamento ilustrado na Figura 5.4, e que realça o papel das condições atmosféricas bem como do caudal afluyente no volume de água armazenada no leito.



**Figura 5.4** - Nível piezométrico registado temporalmente, em relação a uma cota de referência.

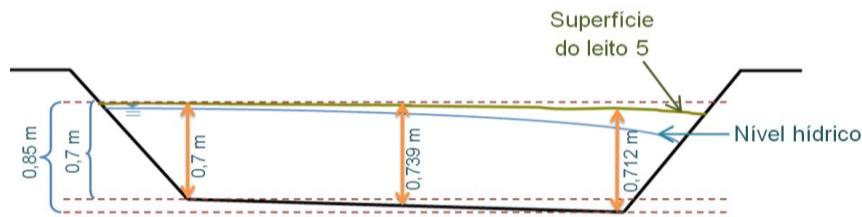
Na Figura 5.4 está retratada a variação do nível piezométrico no leito 5 ao longo do período de análise, sendo patente a influência dos caudais afluentes na alteração deste nível, já a Figura 5.5 ilustra a variação espacial no leito 5, que reflecte o aumento de resistência ao escoamento no piezómetro c, alterando a linha piezométrica ao longo do leito.



**Figura 5.5** - Nível registado espacialmente nos três piezómetros para seis dias.

O volume armazenado de água no leito pode ser calculado para cada dia, através dos níveis hídricos registados diariamente (Figura 5.4).

Tendo em conta o desnível que ocorre á superfície do leito 5 no sentido do escoamento e o desnível do fundo do leito pode aferir-se que na realidade o leito possui as seguintes alturas no enchimento (Figura 5.6).

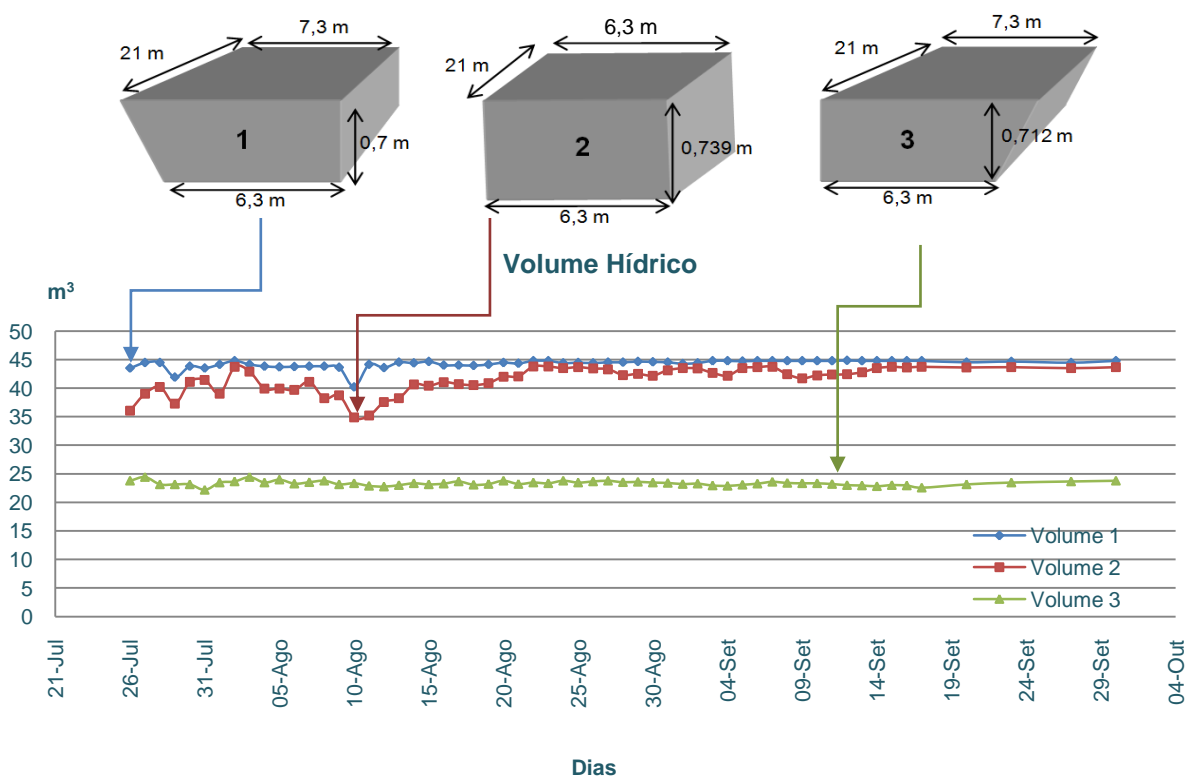


**Figura 5.6** - Alturas reais do enchimento no leito 5.  
(Nota: Imagem sem escala)

De modo a poder calcular o volume de água armazenado diariamente é necessário fazer uma aproximação ao volume real do leito 5, que como se analisou anteriormente, não é o ideal para a realização deste cálculo, sendo assim optou-se por dividir o leito em três partes, realizando os cálculos para cada sub - volume delimitado conforme a Figura 5.7.

O volume total diário aproximado para o leito 5 encontra-se no Quadro 14 em Anexo. A média de volume armazenado aferida para o leito 5 foi de 109,20 m<sup>3</sup> dos 140,52 m<sup>3</sup> disponíveis para o escoamento. O volume obtido é uma aproximação do volume real não sendo por isso um volume que reflecte a realidade do sistema a 100%, contudo esta aproximação dá-nos algumas indicações úteis para a compreensão do sistema.

Na Figura 5.7 encontra-se ilustrada a variação do volume de cada sub-volume considerado tornando possível uma comparação entre as zonas delineadas dentro do leito, uma vez que cada uma contribui com uma capacidade de armazenamento diferente.



**Figura 5.7** - Volumes hídricos do leito 5.  
(Nota: Imagem sem escala)

O sub-volume 3 (mais próximo da saída) apresentou um volume quase constante desde o primeiro dia de medição, quanto ao primeiro e segundo volumes (mais próximos da entrada de afluente) possuem algumas oscilações que espelham as alterações ao nível de caudais de entrada que ocorreram e que estão ilustrados na Figura 5.2.

O menor volume registado no sub-volume 3 indica um aumento da convergência das linhas de corrente para a tubagem de drenagem de saída, criando maior resistência ao escoamento (Figura 5.5 e Figura 5.7), o que levanta algumas considerações à hipótese de *Dupuit*, nomeadamente considerando uma maior resistência do enchimento ao escoamento.

#### 5.4. EVAPOTRANSPIRAÇÃO DIÁRIA

A equação 2.1. do presente trabalho permite, com os dados recolhidos, aferir os valores de evapotranspiração decorrentes do sistema analisado, assim da equação virá:

(equação 5.1.)

(equação 5.2.)

Dados os erros inerentes à medição de caudais e volume (consequentemente da variação do armazenamento) introduziu-se uma parcela de erro á equação do balanço hidráulico apresentada, que passa a ser representada do seguinte modo:

(equação 5.3.)

$\epsilon$  – Erro de fecho da equação do balanço hidráulico

Os valores diários obtidos estão ilustrados na Figura 5.8, confirmam o que se referiu anteriormente, que a evapotranspiração influencia o caudal efluente do leito 5, representando para além deste o único fluxo de saída para estes sistemas, o que torna evidente a sua importância na avaliação destes sistemas.



Figura 5.8 - Evapotranspiração diária



Pela análise dos resultados ilustrados na Figura 5.8 pode afirmar-se que este modo de aferir a evapotranspiração diária tem um nível de erro bastante elevado, não se tornando viável o seu uso para outras avaliações. Foi por isso assumido que a variação do volume de fluido diário do leito 5 era constante (desprezando a variação do fluido na zona não saturada do sistema) resultante de um nível freático também constante a nível diário. Assim a equação 5.3. passa a ser reescrita, do seguinte modo:

(equação 5.4.)

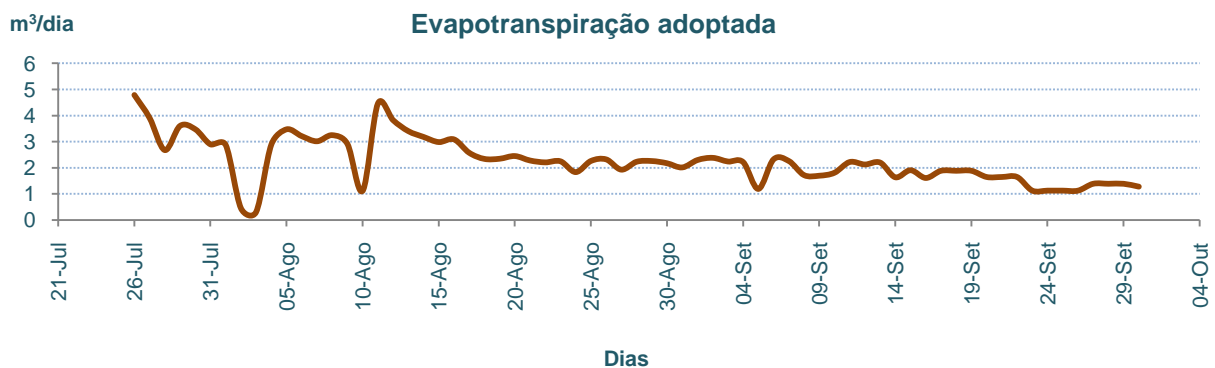


Figura 5.9 - Valores de evapotranspiração adoptados

### 5.5. TEMPERATURAS MÁXIMA E MÍNIMA, PRECIPITAÇÃO E INSOLAÇÃO

Para a realização da presente dissertação os dados meteorológicos relativos à localização da fito-ETAR analisada foram cedidos pela Base Aérea n.º 6, no Montijo, suficientemente próxima (sensivelmente, 12 km) para poder aqui ser usada como equivalente. Dos dados fornecidos permitiram realizar a ligação entre os dados recolhidos no campo e as condições atmosféricas existentes no local no período de análise.

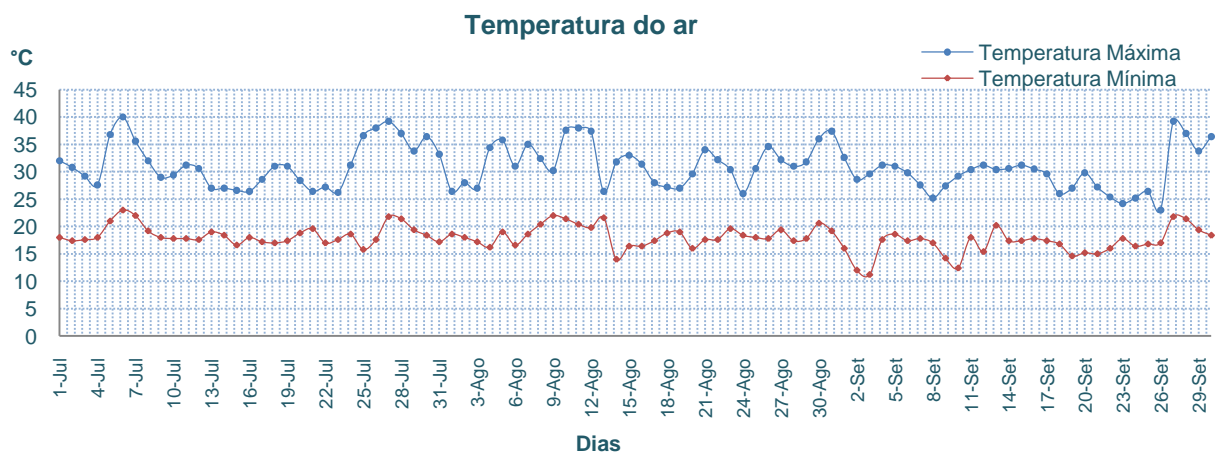
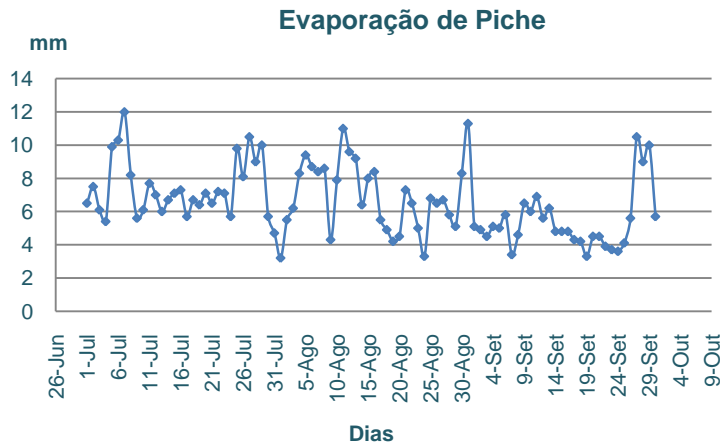


Figura 5.10 - Temperatura do ar registada no período de análise.



Uma vez que as temperaturas registadas corresponderam ao período do Verão, existiram valores de temperatura bastante elevados, atingindo um máximo de 39°C, bem como, mínimos de 11°C, indicando que o espaço temporal de análise do sistema foi bastante influenciado pelas elevadas temperaturas.



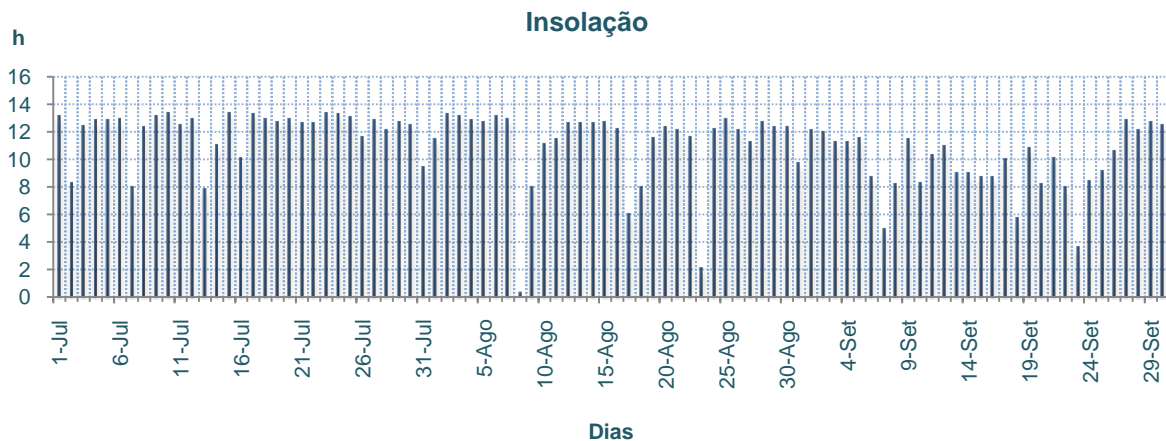
**Figura 5.11** - Evaporação de piche

No seguimento dos valores apresentados para a temperatura do ar, apresentam-se os valores de evaporação de piche medidos para o mesmo período que estão fortemente correlacionados (correlação de Pearson – 0,7) com os valores de temperatura do ar.

A evaporação de piche varia entre valores que podem chegar dos 3 aos 11 mm durante a análise, mostrando a variabilidade que existe

devido às alterações existentes para as temperaturas do ar. O valor de evapotranspiração utilizado na modelação deve reproduzir também esta variabilidade.

Conforme referido anteriormente as condições atmosféricas a insolação torna-se assim, tal como as outras condições, crucial para todas as culturas inclusive de macrófitos uma vez que possibilita a fotossíntese. Os diferentes períodos de luz ao longo do ano indicam à planta em que altura do ano está de forma a realizar o seu ciclo vegetativo (Quelhas dos Santos, 1996).



**Figura 5.12** - Horas de sol diárias

Em relação à precipitação ocorrida houve apenas ocorrência em quatro dias indicados no Quadro 11. Os valores registados não são assinaláveis para que se possa realizar qualquer análise com os dados recolhidos.

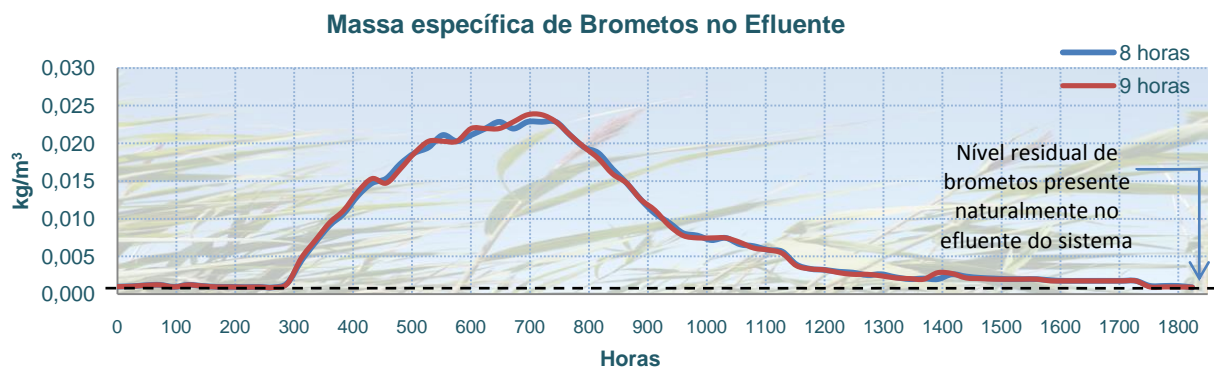
**Quadro 11-** Registos de precipitação.

Dias	Quantidade (mm)	Duração (h)
9 de Agosto	0,9	0,2
24 de Agosto	0,1	0,1
6 de Setembro	0,2	0,2
24 de Setembro	3,6	x

Nota: As células assinaladas com x não têm registo

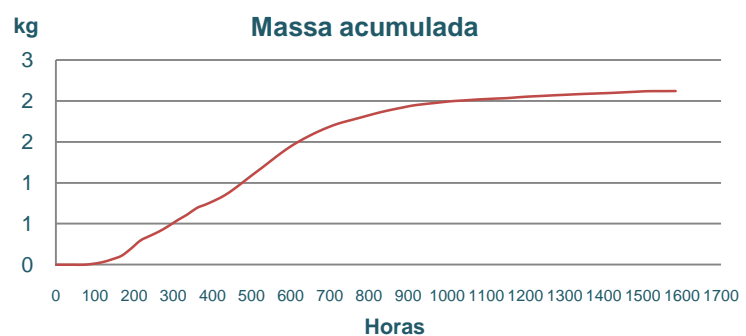
## 5.6. COMPORTAMENTO DO TRAÇADOR

Uma vez realizadas as recolhas diárias de efluente com o intuito de averiguar o comportamento do traçador dentro do sistema, ao longo de cerca de três meses pôde obter-se alguma informação desses mesmos períodos analisados.



**Figura 5.13** - Concentração de brometos presente no efluente, ao longo do tempo, recolhido às 8 e 9 horas.

A Figura 5.13 apresenta a massa específica de brometos presentes no efluente às 8 e às 9 horas da manhã ao longo do tempo de amostragem (desde dia 16 de Julho a 30 de Setembro em horas). O traçador foi injectado dia 26 de Julho (ilustrado no gráfico - Figura 5.13 - às 240 horas) e cerca de três dias depois (às 288 horas) foi detectada a presença de brometos no efluente, os valores em brometos tiveram um máximo entre as 696 horas e as 720 horas (correspondente aos dias 14 e 15 de Agosto) apresentando posteriormente um decréscimo até às 1824 horas (30 de Setembro).



**Figura 5.14** - Massa de brometos acumulada ao longo da experimentação

A taxa de recuperação do traçador no efluente encontra-se na ordem dos 65%, dado que, se injectaram 3,3 kg de brometos (Figura 5.14). O tempo que decorreu desde a entrada do traçador até que alcança-se o nível residual de brometos no sistema foi de 1584 horas (aproximadamente 66 dias).

Quando se conjugam os dados de caudal efluente e de massa específica obtemos a massa de brometos ao longo de cada dia. Esta relação traduz a interdependência entre a massa específica de brometos e o caudal efluente.

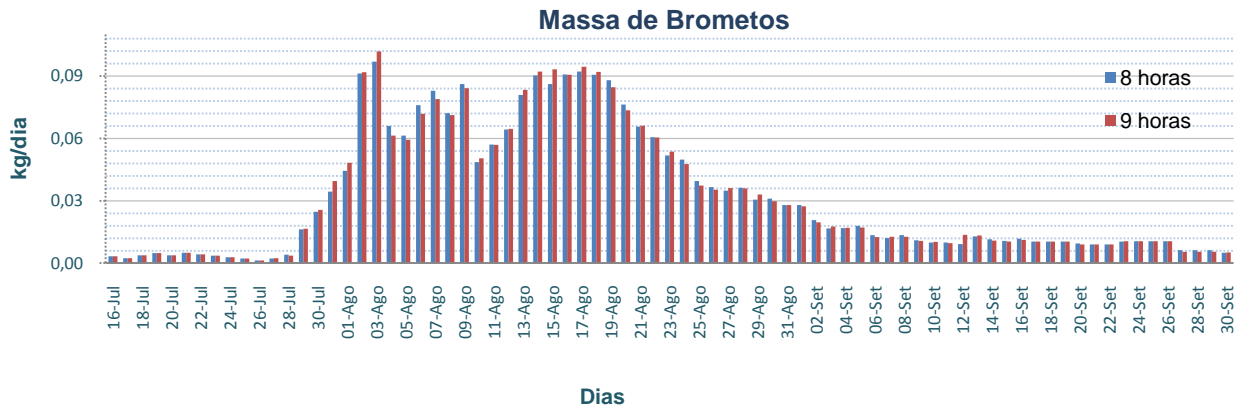


Figura 5.15 - Massa de brometos emitida diariamente no efluente

A Figura 5.15 foi elaborada, apenas com base nos valores diários recolhidos às 8 e às 9 horas de cada dia contudo, ao analisar a Figura 5.16 a evidência da interdependência entre a massa específica de brometos e o caudal efluente sobressai ainda mais aquando da comparação do período de amostragem diária de doze horas realizado por 7 dias.

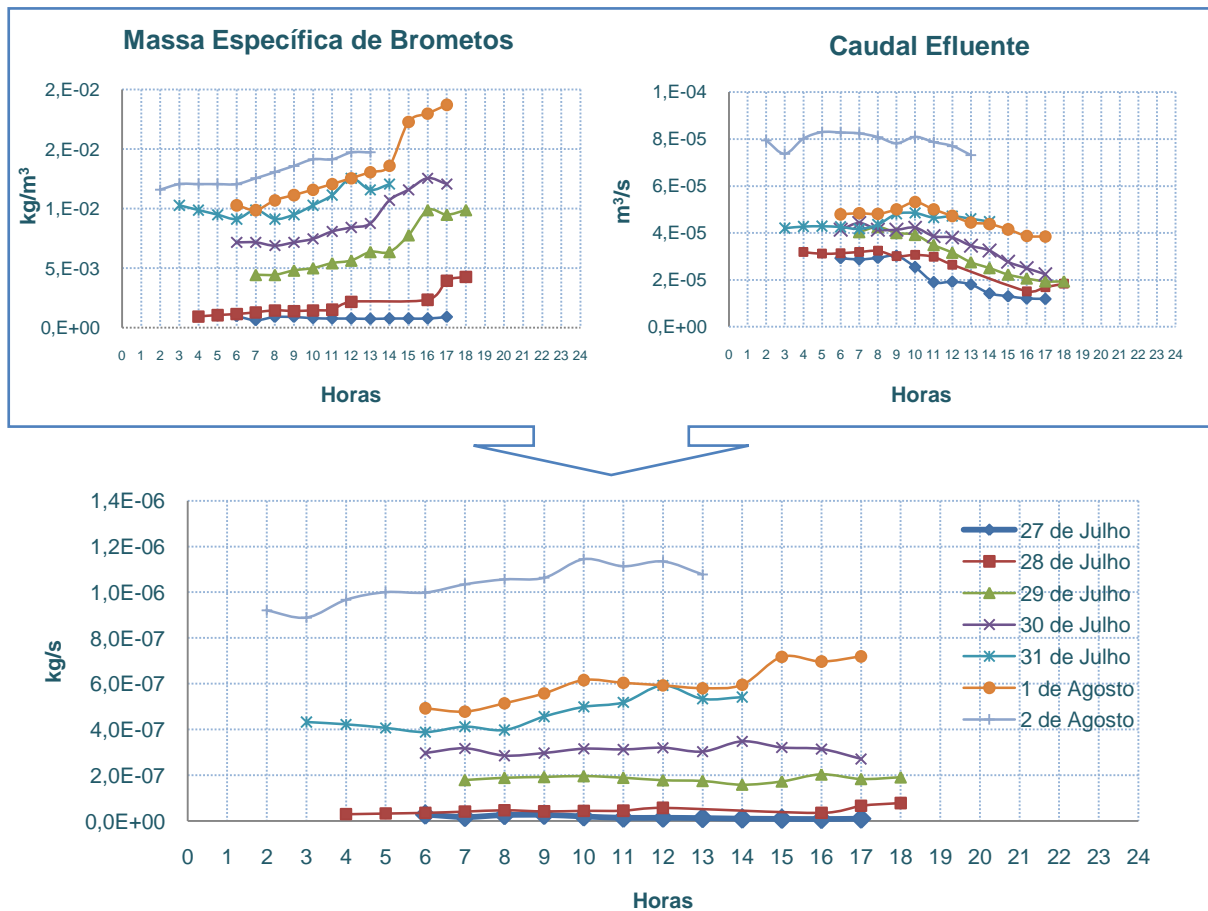


Figura 5.16 - Massa específica, caudal efluente e massa de brometos num período de doze horas.

Pela análise dos gráficos da Figura 5.16 pode declarar-se que ao longo do período de amostragem a massa específica de brometos aumenta proporcionalmente com a diminuição de caudal efluente, contudo a massa de brometos que é emitida de hora a hora não traduz essa variação uma vez que se mantém relativamente estável.

Sendo assim, o período de amostragem efectuado revelou-se o mais indicado para a caracterização do sistema dado que a massa de iões brometo emitida no período de um dia não possui alterações assinaláveis.

Em relação à variação que existe dentro de cada período de 60 minutos esta não é evidente nem quando se compara a massa específica com o caudal efluente, assim também não se evidencia na massa de iões brometo emitida, como seria de esperar depois da análise efectuada anteriormente para o período de doze horas.

### 5.7. BALANÇO DE BROMETOS NO SISTEMA

No decorrer da análise ocorreu a percepção de que a massa de brometos recolhida no efluente não seria igual à massa de brometos injectada (65% de recuperação), sendo assim, no último dia de amostragens ao efluente procedeu-se à recolha de material vegetal e de solo como descrito na Figura 4.3. Os resultados foram conclusivos em relação à distribuição dos iões brometos nos restantes 35% de massa de iões brometo. A estimativa da biomassa existente no leito 5 foi efectuada a partir da determinação do peso seco a 105° das amostras foi a seguinte:

- Quantidade de raízes no volume total do leito 5 é de  $3,31 \times 10^3$  kg;
- Quantidade de folhas na área total do leito 5 é de  $5,80 \times 10^2$  kg;
- Quantidade de caules na área total do leito 5 é de  $1,38 \times 10^3$  kg;
- Quantidade de inflorescências na área total do leito 5 é de  $7,50 \times 10^1$  kg.

Pelo que pode aferir-se que a quantidade de iões brometos encontrada na biomassa do leito 5 representa apenas 3% (Figura 5.17) de toda a massa de brometos recuperada nas três fracções do leito (biomassa; efluente e solução do solo).

Numa análise mais aprofundada da absorção de iões brometos pelas plantas do leito podemos afirmar que existem órgãos desta espécie de plantas com maior apetência para a absorção destes iões como as folhas e os caules, representando as inflorescências o órgão com menor quantidade de brometos na sua estrutura.

As percentagens descritas na Figura 5.18 validam as afirmações anteriores e foram alcançadas através dos dados da estimativa da biomassa e das análises efectuadas às amostras recolhidas dos nove pontos de amostragem ilustrados na Figura 4.3. Um facto a reter será o valor encontrado nas raízes que, não sendo o esperado, representa o terceiro

Distribuição de brometos

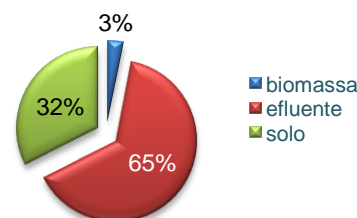
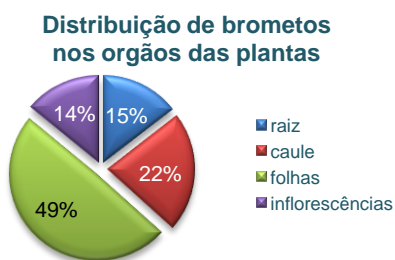


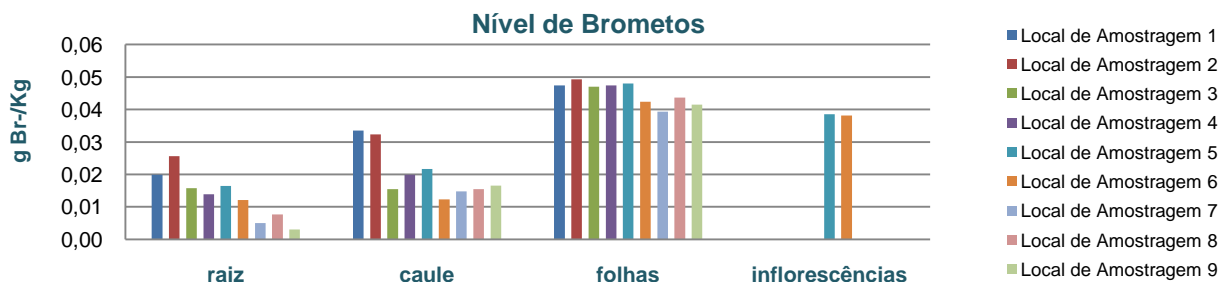
Figura 5.17- Distribuição de brometos na biomassa, no efluente e na solução do solo



**Figura 5.18** - Distribuição de brometos nas plantas

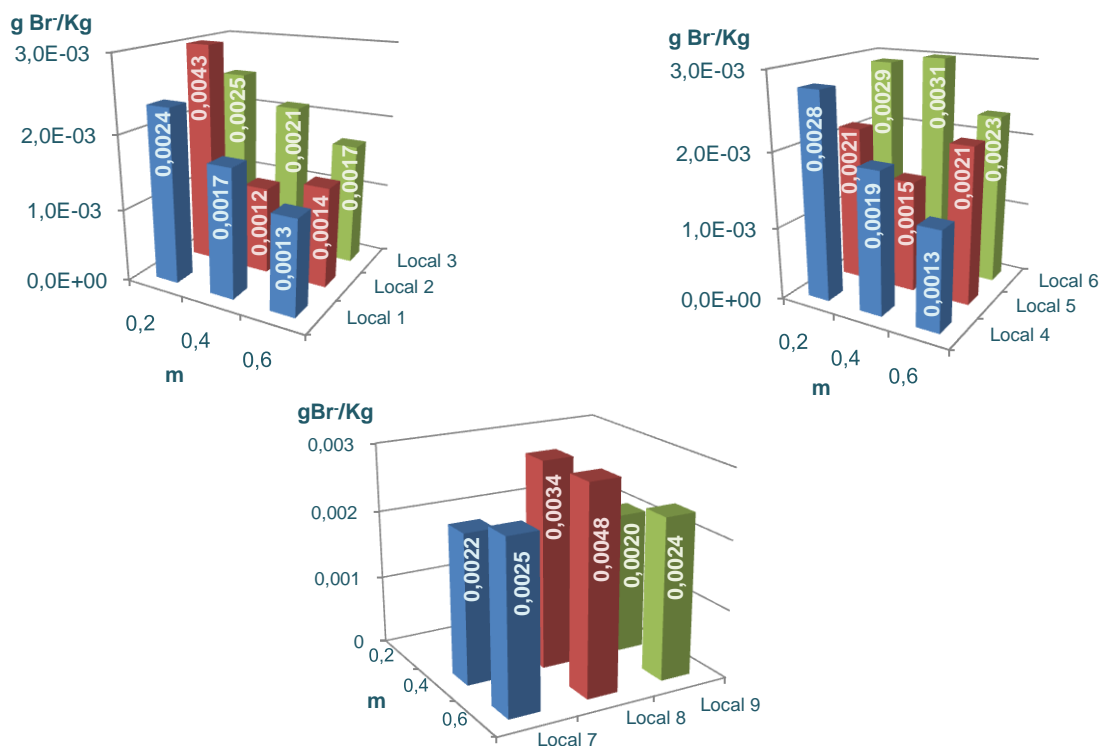
órgão a fixar maior quantidade de brometos, os restantes órgãos registaram um comportamento de acordo com a bibliografia consultada (ponto 2.5.).

O gráfico representado na Figura 5.19 demonstra as diferenças existentes ao nível dos locais de amostragem, onde os locais de amostragem mais afastados da entrada do leito 5 em que se injectou o traçador (locais 7-8-9) possuem em média menor quantidade de brometos nas estruturas das plantas.



**Figura 5.19** - Nível de brometos registados para os diferentes órgãos das plantas (*Phragmites australis*)

A segunda maior fracção de massa de brometos foi encontrada na solução do solo, representando esta 32% da massa inicial total. Esta percentagem reforça a ideia de que existem zonas dentro do leito zonas de escoamento mais rápido e zonas de escoamento mais lento, ou mesmo nulo, espelhando assim uma realidade complexa de caracterizar em modelação.



**Figura 5.20** - Nível de brometos nas diferentes profundidades nos diversos locais de amostragem

A Figura 5.20 ilustra o carácter não uniforme do escoamento no leito 5, não sendo por isso possível, através dos dados recolhidos, estabelecer qualquer padrão quanto comportamento do ião brometo no interior do leito, nas diversas profundidades e nos diferentes locais de amostragem.

Pode, no entanto, denotar-se que nas camadas mais superficiais a massa de brometos encontrada foi, em média mais elevada, facto que pode ocorrer devido, à matéria orgânica que se encontra em decomposição à superfície (Figura 5.13) e aos fluxos verticais gerados pela evapotranspiração, que podem transportar massa de brometos para os níveis superiores do leito.

Todas as amostras foram analisadas num potenciómetro com uma precisão de  $\pm 2\%$  de concentração de  $\text{Br}^-$  em cada medição, esta precisão pode ter amplificado ou diminuído as percentagens indicadas na Figura 5.17 e Figura 5.18. A massa de iões brometo obtida no total pelas medições e estimativas teve uma diminuição de cerca de 0,4%, em relação á massa injectada.

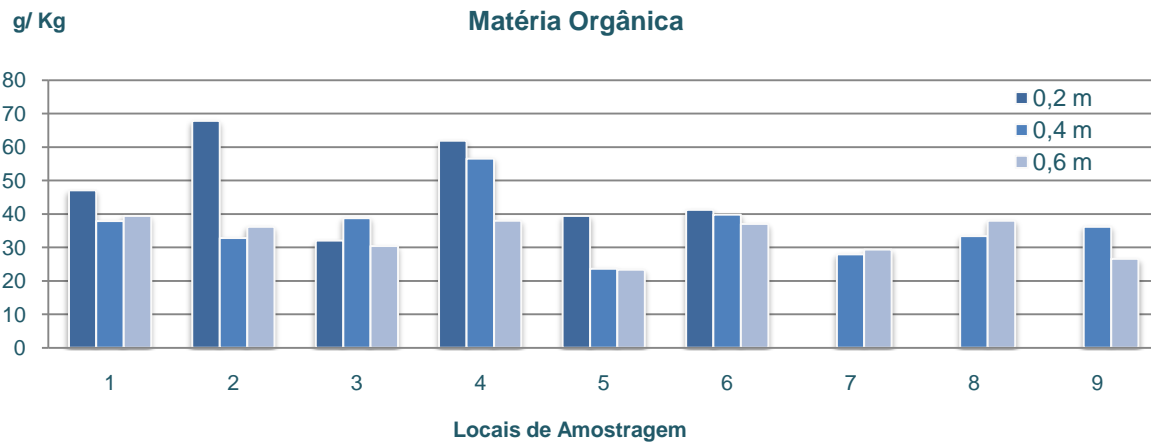
## 5.8. MATÉRIA ORGÂNICA NO ENCHIMENTO DO LEITO

A não remoção a cada ciclo vegetativo da biomassa existente nos leitos, originou teores de matéria orgânica assinaláveis no interior do meio de enchimento.

Os solos de textura arenosa são de forma geral descritos como sendo mais pobres em matéria orgânica que os solos com textura mais fina, dado que ocorre muita lixiviação (Quelhas dos Santos, 1996). Estes factores são do ponto de vista do crescimento de culturas restritivos, contudo no âmbito desta fito-ETAR a textura mais grosseira do solo/enchimento é determinante para o seu normal funcionamento. O facto de ocorrer uma elevada lixiviação nos meios arenosos origina que o escoamento se faça sem grandes impedimentos, ocorrendo colmatação apenas em casos específicos.

No leito analisado, ao contrário do que se esperaria para qualquer meio arenoso, o teor em matéria orgânica é alto, cerca de 40 g/kg de solo (classificação segundo - (Varenes, 2003)). Para o caso deste sistema, esta ocorrência pode dever-se há não realização de cortes anuais periódicos da biomassa e à quantidade de biomassa em forma de raízes que realiza todo o seu ciclo de vida no interior do enchimento.

O contributo do afluente para a matéria orgânica encontrada no enchimento do solo, também não deve ser desprezado, este pode contribuir directamente (devido às suas próprias características) ou indirectamente através da propiciação de condições (nutrientes) para o desenvolvimento de organismos no enchimento (chegando a representar de 1 a 8% de toda a matéria orgânica).



**Figura 5.21 - Matéria orgânica do meio de enchimento**

A Figura 5.21 ilustra, o que anteriormente foi referido acerca da contribuição dos diversos componentes para o incremento da matéria orgânica do enchimento do leito 5.

A camada superficial possui em média maior proporção de matéria orgânica contudo seria de esperar um decréscimo em profundidade, o que não ocorreu em média evidenciando o papel das raízes e das características do afluente.

## 5.9. TEMPO DE RETENÇÃO HIDRÁULICO

O tempo de retenção hidráulico está sempre associado a um determinada fracção da massa. O sistema é definido por uma RTD que se obtém pela curva de distribuição do traçador.

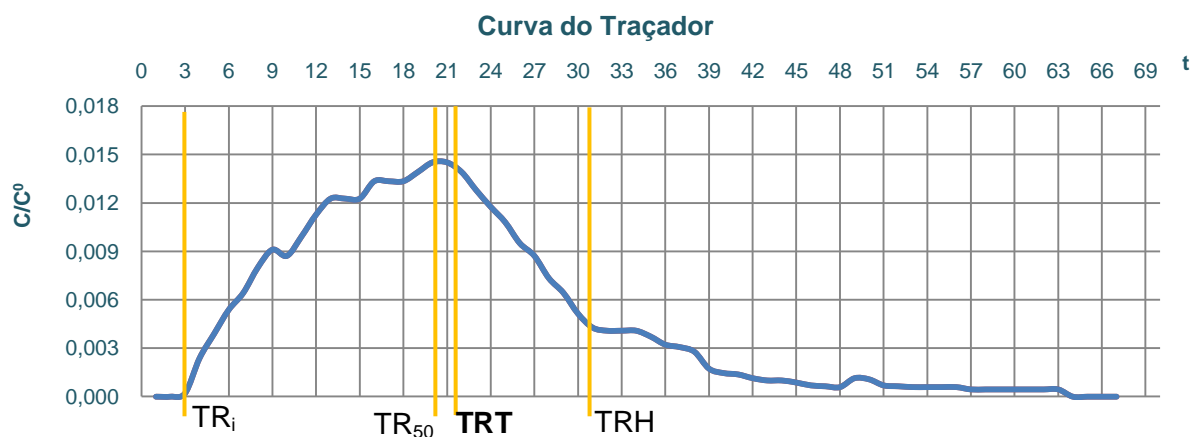
O tempo de retenção hidráulico (TRH) calculado a partir da equação 2.16, obtendo-se um valor de 30,20 dias.

O tempo médio de retenção hidráulico do traçador (a resolução de equação foi feita numericamente pelo método dos trapézios) situou-se nos 21,13 dias. Esta diferença de valores deve-se, essencialmente, às características do enchimento, à distribuição da rizosfera e aos mecanismos de transporte, onde devido à grande heterogeneidade dos tubos de corrente a dispersão mecânica adquire grande importância.

O tempo correspondente à saída de 50% da massa de traçador do leito foi cerca de 19,79 dias ( $TR_{50}$ ).

Todos estes mecanismos e processos originam velocidades de escoamento diferentes para as várias partículas constituintes do traçador, promovendo zonas no enchimento onde o escoamento se realiza de forma mais rápida e zonas em que o escoamento é mais lento ou mesmo nulo.

Na Figura 5.22 estão ilustrados graficamente dos vários tempos de retenção característicos para o traçador utilizado.



$C$  - Concentração do traçador à saída do leito num determinado tempo.  
 $C_0$  - Massa inicial de traçador injectada dividida pelo volume poroso total do leito 5  
 $TR_i$  - Tempo do aparecimento inicial do traçador  
 $TRT$  - Tempo médio de retenção hidráulico do traçador  
 $TRH$  - Tempo de retenção hidráulico teórico  
 $TR_{50}$  - Tempo de retenção hidráulico correspondente à saída de 50% da massa de brometos

**Figura 5.22** - Tempo característico para a curva do traçador à saída do leito 5

A relação entre os vários tempos indica o quão longe se está de um modelo de escoamento considerado ideal. Através das razões entre os vários tempos podem encontrar-se as causas possíveis para o escoamento no sistema analisado (Chazarenc, et al., 2003):

- —  $\Rightarrow$  Ocorrem zonas de escoamento preferencial (quanto menor for o valor mais acentuado o fenómeno). O valor obtido para esta razão com os dados de campo foi, 0,66.
- — Indica a ocorrência de zonas estagnadas devido à existência de zonas “mortas”, o valor para esta razão foi de 0,70 apontando para a ocorrência deste fenómeno com alguma relevância dentro do leito.



"Se, a princípio, a ideia não é absurda, então não há esperança para ela."  
Albert Einstein, 1879-1955.

## 6. MODELAÇÃO DO COMPORTAMENTO HIDRÁULICO

As condições hidráulicas das fito-ETAR contribuem para o grau de eficiência na remoção de poluentes, requerendo, assim, uma análise mais cuidada das mesmas.

O sistema analisado pode ser considerado como um tanque, de acordo com a teoria dos reactores (abordada no ponto 2.4). A diferença entre a teoria descrita anteriormente e a realidade do sistema a modelar é a existência de dois *inputs* não existentes na teoria dos reactores examinados: a evapotranspiração e a existência de caudais afluentes variáveis diariamente.

As condições de ensaio planeadas foram no sentido de manter a altura piezométrica da água no reservatório estável.

A variabilidade da evapotranspiração e dos caudais afluentes originaram uma variação no nível piezométrico que foi considerada suficientemente pequena para assumir um regime estacionário para a água a nível diário. Assim, considerou-se que a diferença entre os caudais de entrada e saída é igual à evapotranspiração.

O modelo considera duas massas em movimento no interior do reservatório:

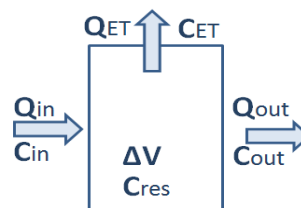
1. Massa de água
2. Massa de soluto

Para modelação do movimento da massa de água considerou-se a altura de água dentro do reservatório constante (regime estacionário), dado que, está fora do âmbito da presente dissertação a simulação do fluxo de água com regime variável.

A aproximação efectuada baseou-se no pressuposto, que a diferença entre o caudal afluente e o efluente é igual ao caudal de evapotranspiração. Os caudais no meio poroso são fluxos horizontais que transportam soluto dissolvido (traçador  $\text{Br}^-$ ) ao longo de todo o reservatório desde a entrada até à saída. Quanto ao fluxo de evapotranspiração, este é vertical e pode transportar massa de soluto para os níveis superiores do reservatório, para o exterior das secções do escoamento horizontal (podendo acumular-se nesses níveis e retornar, contudo esse processo não será analisado).

Para a massa de água as equações da continuidade (assumindo  $\Delta V=0$ ) e de fluxo utilizadas no modelo foram:

(equação 6.1.)



(equação 6.2.)

**Figura 6.1** - Representação esquemática dos fluxos.

Para a modelação da massa de soluto fez-se uma análise considerando os princípios de modelação em reactores, com regime não estacionário e a concentração do soluto dentro do reservatório, em qualquer local, é variável ao longo do tempo ( $\Delta m \neq 0$ ).

(equação 6.3.)

- Fluxo de massa afluyente de soluto [ $MT^{-1}$ ]

- Fluxo de massa de efluente soluto [ $MT^{-1}$ ]

$m_{ET\ t}$  - Fluxo de massa transportada pelos fluxos verticais originados pela evapotranspiração no tempo  $t$ , não sujeitos ao fluxo longitudinal. [ $MT^{-1}$ ]

$t$  – representa o tempo. [ $T^{-1}$ ]

$\Delta t$  – passo de tempo na resolução numérica.

Para o modelo de reactor CSTR as equações utilizadas para os movimentos da massa de soluto foram as seguintes:

(equação 6.4.)

(equação 6.5.)

Sendo  $C_{res.} = C_i$  (concentração inicial injectada), para  $t=0$ .

(equação 6.6.)

(equação 6.7.)

Sendo  $V$  o volume do tanque.

Para o modelo de reactor PFR, onde água e soluto têm comportamento de escoamento do tipo pistão, significando que, não ocorre mistura entre massas de água ou entre solutos, a curva de efluência simulada é ilustrada na (Figura 6.2).

É evidente que este tipo de modelo é completamente inadaptado a este sistema, em que se obteve um tempo de retenção da massa total de 35 dias, que se afasta completamente dos resultados obtidos.

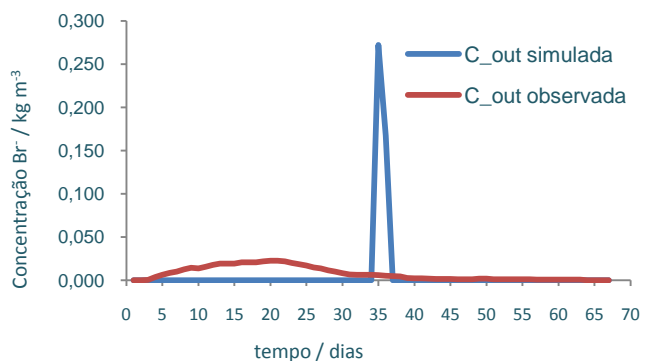


Figura 6.2 - Simulação para escoamento do tipo pistão

Para reactor tipo CSTR, constituído apenas por um tanque/camada, onde a água tem comportamento de escoamento pistão, mas o soluto sofre difusão originando mistura completa no reservatório, o resultado é apresentado na (Figura 6.3). Também esta simulação se afasta muito das condições observadas.

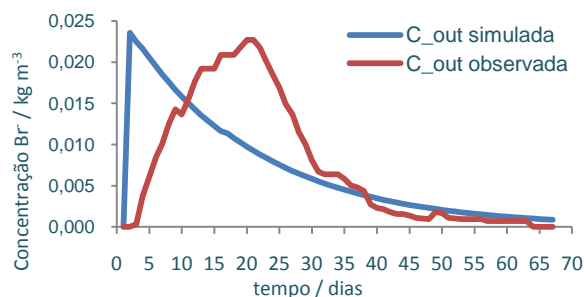


Figura 6.3 - Simulação para escoamento de mistura completa

O mesmo tipo de reactor CSTR foi analisado utilizando um número crescente de tanques em serie, dividindo-se o tanque inicial em  $n$  tanques de igual volume. A solução efluente do tanque de ordem  $k$  é igual à solução afluente de ordem  $k+1$ . O número de tanque  $n$ , passa a constituir um parâmetro de calibração do modelo. A Figura 6.4 mostra os resultados obtidos para valores de  $n$  crescentes até 4.

Considerando os tanques em série é possível aproximar-se da forma da curva de efluência observada. No entanto os resultados continuam a não ser satisfatórios pois para  $n=3$  não se atingem os valores observados no pico e para  $n=4$  verifica-se um atraso nas efluência.

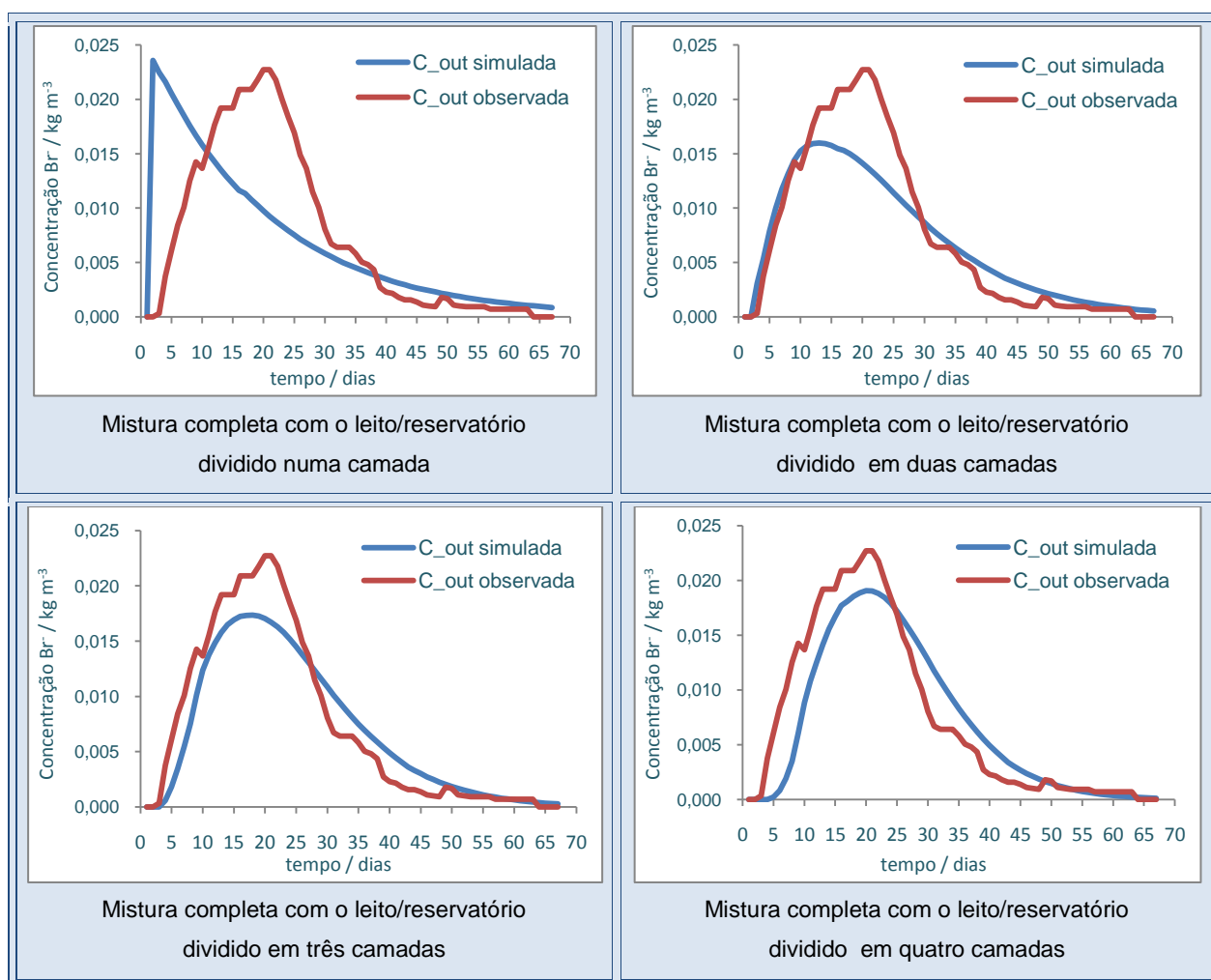


Figura 6.4 - Simulação para escoamento de mistura completa com diversas camadas.

Do ponto de vista da realidade, o meu sistema afastar-se-á dos modelos propostos para os reactores ideais de tanques, uma vez que se trata de um movimento de soluto num meio poroso.

A água movimenta-se ao longo de tubos de escoamento muito irregulares, quer do ponto de vista da tortuosidade do percurso, quer do ponto de vista da área das secções de escoamento.

Em função da estrutura deste meio poroso podem ocorrer zonas de transporte mais rápido e zonas onde o soluto poderá permanecer quase imóvel. Esta forte variação no campo de velocidades torna mais importante, nos modelos que consideram velocidades médias, o fenómeno da dispersão em relação ao movimento do soluto por difusão. Existem igualmente vários tipos de aproximações para modelar o escoamento nestes campos de velocidade heterogéneos, quer considerando escoamentos preferenciais ou mesmo regiões imóveis, onde a transferência do soluto para regiões móveis se faz por difusão.

A aproximação de simulação seguinte pretendeu acelerar o escoamento da solução, admitindo um escoamento semi-pistão para a água. Coloca-se a hipótese de uma parte do escoamento da água se processar de forma pistão através de macroporos do solo, a restante fracção dispersa-se no interior do reservatório misturando-se com a solução residente. Isto resulta do ponto de vista prático, num modelo de mistura parcial para o soluto.

As equações utilizadas para a água consideram o regime estacionário e são:

As equações utilizadas para o soluto consideram no movimento longitudinal uma mistura parcial do soluto entrado com o soluto residente, resultando numa quantidade de massa transportada num fluxo de solução sem mistura,  $m_{conv}$  e noutra quantidade de massa que é transportada num fluxo de solução que sofreu dispersão no reservatório misturando-se com a solução residente,  $m_{disp}$ . A equação de conservação de massa é:

(equação 6.8.)

- Fluxo de massa de soluto transportada sem mistura  $[MT^{-1}]$
- Fluxo de massa de soluto transportada com mistura  $[MT^{-1}]$

As equações de fluxo são:

(equação 6.9.)

(equação 6.10.)

(equação 6.11.)

Sendo a concentração da solução residente temporária, durante  $\Delta t$ , antes de ocorrer transferência dispersiva,

(equação 6.12.)

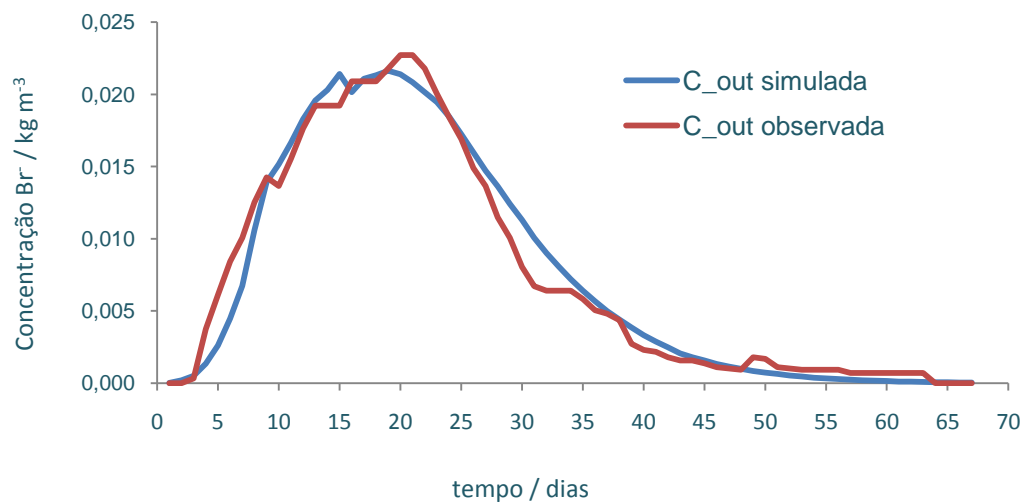
sendo V o volume da solução residente.

O parâmetro a varia de 0 a 1 representa a fração da solução entrada que se mistura com a solução residente.

A concentração residente no final do passo de cálculo é dada por:

(equação 6.13.)

Este modelo foi aplicado para uma serie de n tanques, sendo n também um parâmetro de calibração, o resultado para  $a=0,9$  e  $n=5$  é apresentado na Figura 6.5.



**Figura 6.5** - Resposta simulada do modelo elaborado

O resultado obtido é considerado satisfatório, embora se possa considerar no futuro uma análise mais detalhada dos processos de transferência do soluto no leito.

Como indicador de precisão da simulação utilizou-se a soma do quadrado dos desvios SQR

(equação 6.14.)

e o desvio médio quadrático, que nos dá uma indicação do erro médio da simulação ao longo do tempo, dado por DMQ:

$$\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}{n-1}$$

(equação 6.15.)

O valor encontrado para o SQR foi de  $0,0001227 \text{ (kg/m}^3\text{)}^2$ . Para o DMQ o valor encontrado foi  $0,00136 \text{ kg/m}^3$ . O desvio máximo ( ) é  $0,00395 \text{ kg/m}^3$ .

*"Os conceitos e princípios fundamentais da ciência são invenções livres do espírito humano"*  
Albert Einstein, 1879-1955.

## 7. CONCLUSÕES

A poluição causada pela descarga de águas residuais sem qualquer tratamento constitui uma fonte significativa de poluição podendo levar à contaminação dos meios hídricos.

Para inverter esta realidade tornou-se necessário encontrar alternativas para o saneamento básico, nomeadamente para pequenos aglomerados, uma das soluções adoptadas baseia-se na aplicação dos princípios naturais de depuração das zonas húmidas, as fito-ETAR.

As fito-ETAR são sistemas do ponto de vista técnico simples, com custos de operação/manutenção relativamente baixos, contudo a sua complexidade reside precisamente nos processo e mecanismos de origem natural que nele decorrem e onde o controlo antrópico é reduzido.

De modo a compreender o comportamento destes sistemas foram realizados no âmbito da presente dissertação de mestrado diversos estudos de campo na fito-ETAR da Barroca d'Alva no concelho de Alcochete.

A análise envolveu duas vertentes distintas, mas complementares - a primeira das quais, estudos de campo onde se examinaram os equipamentos constituintes deste sistema e o seu modo de funcionamento, registos de caudais afluentes/efluentes diários, medições do nível piezométrico no interior do leito 5 e amostragens aos vários componentes dos leitos. Esta acções geraram uma serie de dados relevantes para a compreensão do sistema.

Desta primeira análise pôde constatar-se que o enchimento do leito (de textura arenosa) tem uma importância fulcral para a depuração do caudal afluente através do leito, a sua porosidade permite uma área útil para o escoamento de  $140,52 \text{ m}^3$ , permitindo também o pleno desenvolvimento dos macrófitos. No interior do enchimento, ao longo do período de estudo, foram armazenados em média  $109,20 \text{ m}^3$  (diariamente) de afluente para depuração

O regime estacionário que se quis estabelecer foi perturbado por diversas anomalias como a desregulação do caudal da torneira de água potável causada por motivos desconhecidos, contudo as alterações foram consideradas suficientemente pequenas para assumir um regime estacionário para a água a nível diário.

Os caudais afluentes diários sofreram reduções que alcançaram por vezes os 78% do seu volume, o que demonstra o papel da evapotranspiração (principalmente na época de Verão) na redução de volume de fluido do sistema.

O ensaio da injeção do traçador Brometo de Potássio teve uma duração de 1584 horas (aproximadamente 66 dias) com uma taxa de recuperação de iões brometo no caudal efluente de 65%. O traçador demorou cerca de 72 h após a sua injeção até ser detectado no caudal efluente e teve um máximo de concentração entre 696 horas e as 720 horas. Dado que não foi recuperada a

totalidade da massa injectada de Br<sup>-</sup> realizaram-se diversas amostragens de forma a estudar a sua distribuição nos componentes do leito 5, chegando-se à conclusão que da restante massa não recolhida no afluente (35%), 32% encontrava-se na solução do enchimento e apenas 3% estava retida nas diversas partes dos macrófitos do leito (49% nas folhas, 22% nos caules, 14% nas inflorescências e 15% nos rizomas).

O Método Potenciométrico utilizado na determinação dos iões brometo mostrou-se rápido e eficaz, uma vez que estes são muito solúveis em água facilitando a leitura.

O nível piezométrico registado nas três zonas de análise dentro do leito 5 revelou uma resistência ao escoamento na proximidade da tubagem de drenagem de efluente, devido à convergência das linhas de corrente.

O tempo de retenção hidráulico calculado foi superior ao tempo médio de retenção do traçador realçando a importância das características do enchimento, da distribuição da rizosfera e dos mecanismos de transporte

A segunda vertente da presente dissertação incidiu na elaboração de um modelo unidimensional simplificado aplicado ao transporte de solutos não reactivos, a partir dos resultados obtidos da aplicação do traçador.

A aproximação modelar permitiu simular os tempos de retenção de um soluto não reactivo e foi construído considerando o sistema em estudo como um reactor, com inclusão da evapotranspiração e de caudais afluentes variáveis diariamente.

A simulação efectuada é bastante satisfatória tendo em vista os objectivos propostos nesta dissertação.

**Futuramente**, a aplicação desta aproximação modelar a solutos reactivos nas condições reais de funcionamento da ETAR obriga a inclusão do regime variável. Contudo, a aproximação modelar efectuada pode ser utilizada para solutos reactivos desde que se mantenham as condições de fronteira (regime permanente).



“O segredo da criatividade é saber como esconder as fontes.”  
**Albert Einstein, 1879-1955.**

## 8. BIBLIOGRAFIA

**Alves, J. M. 2001.** Flora e Vegetação de Zonas Húmidas. Ponte de Lima : s.n., Junho de 2001. Instituto da Conservação da Natureza – Parque Natural de Sintra-Cascais.

**Alves, T. 2009.** *Efeito dos exsudados radiculares na mineralização de resíduos orgânicos aplicados ao solo.* Lisboa : s.n., 2009. Universidade Técnica de Lisboa; Instituto Superior de agronomia.

**APHA; AWWA; WEF. 1998.** *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater.* [ed.] L. Clesceri, A. Greenberg e A. Eaton. 20. 1998. APHA- American Public Health Association; AWWA - American Water Works Association; WEF - Water Environment Federation.

**Cameira, M.R. C. 1999.** *Balanço de água e azoto em milho regado no Vale do Sorraia: discussão dos processos de transferência e aplicação do modelo RZWQM98.* 1999. Universidade Técnica de Lisboa; Instituto Superior de Agronomia.

**Campos Oliveira, J.M. S. 2007.** *Diagnóstico e optimização do tratamento de águas residuais em leitos de macrófitas.* Porto : s.n., 2007. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

**Canais Seco, M.T. 2008.** *Avaliação de leitos de macrófitas no tratamento de águas residuais domésticas em Portugal: Sistemas de Fluxo Sub-Superficial Horizontal.* Vila Real : s.n., 2008. Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro.

**Carmona, E. 2009.** Ordem dos Arquitectos - delegação do distrito de Castelo Branco. *Urbanismo Sustentável.* [Online] 2009. [Citação: 18 de Maio de 2010.] <http://www.oa-castelobranco.org/conteudos/files/arquitectura/>.

**Catarino, L., et al. 2001.** *Plantas aquáticas infestantes de valas e canais.* Lisboa : ISA Press, 2001. pp. 5-8,82-83.

**Cavalheiro, C. 2005.** *Estudo da hidrodinâmica do processo de ozonização da ETA de Lever.* Porto : s.n., 2005. Universidade do Porto; Faculdade de Engenharia.

**Chazarenc, F., Merlin, G. e Gonthier, Y. 2003.** Hydrodynamics of horizontal subsurface flow constructed wetlands. *Ecological Engineering.* 2003, Vol. 21, pp. 165-173.

**Costa, A. 2001.** *As Relações Hídricas das Plantas Vasculares.* 2001. Departamento de Biologia; Universidade de Évora.

**CSSS. 1993.** *Soil Sampling and Methods of Analysis.* [ed.] M. Carter. s.l. : Lewis Publishers, 1993. CSSS -Canadian Society of Soil Science.

**Dias, V. N., Pacheco, P. M. e Soutinho, E. A. 2000.** FITO-ETARs: mecanismos de depuração e papel das plantas. [ed.] APRH - Associação Portuguesa dos Recursos Hídricos. *5º Congresso da água - A água e o desenvolvimento sustentável: Desafios para o novo século.* Lisboa : s.n., 25 a 29 de Setembro de 2000. pp. 243-244. Tema 6 - Ciclo Urbano da Água.

**E.P.A. 2000.** *Manual: Constructed wetlands treatment of municipal wastewaters.* Ohio : s.n., 2000. Environmental Protection Agency; National Risk Management Research Laboratory.

- EPA. 2000.** U. S. Environmental Protection Agency. *A Guide to Creating Wetlands for Agricultural Wastewater, Domestic Wastewater, Coal Mine Drainage and Stormwater in the Mid-Atlantic Region*. [Online] 2000. [Citação: 23 de Junho de 2010.] [www.epa.gov/owow/wetlands/pdf/hand.pdf](http://www.epa.gov/owow/wetlands/pdf/hand.pdf).
- Espírito Santo, L.A. T. 2008.** *Sistemas Simplificados de Saneamento de Águas Residuais- Abordagem Integrada*. Lisboa : s.n., 2008. Universidade Técnica de Lisboa; Instituto Superior Técnico.
- Galvão, A. F. 2009.** *Comportamento Hidráulico e Ambiental de Zonas Húmidas Construídas Para o Tratamento de Águas Residuais*. 2009. Universidade Técnica de Lisboa; Instituto Superior Técnico.
- García, J., et al. 2004.** Hydraulic behaviour of horizontal subsurface flow constructed wetlands with different aspect ratio and granular medium size. *Ecological Engineering*. 2004, Vol. 23, pp. 177–187.
- INE. 2010.** Instituto Nacional de Estatística. [Online] 2010. [Citação: 26 de Agosto de 2010.] [http://maps.ine.pt/MapsPortal/%28S%28vv1g30454yhdppvok0zpjxef%29%29/default.aspx?VAR\\_CD=0000611&V\\_DIM\\_1=S7A2009&NIVEL=3&LINGUA=PT](http://maps.ine.pt/MapsPortal/%28S%28vv1g30454yhdppvok0zpjxef%29%29/default.aspx?VAR_CD=0000611&V_DIM_1=S7A2009&NIVEL=3&LINGUA=PT).
- Infopédia. 2006.** Infopédia. *Enciclopédia e Dicionários, Porto Editora*. [Online] Porto Editora, 03 de Julho de 2006. [Citação: 10 de Maio de 2010.] [http://www.infopedia.pt/\\$custos-economicos-da-poluicao](http://www.infopedia.pt/$custos-economicos-da-poluicao).
- Instituto da Água. 2004.** Plano Nacional da Água. 2004. Ministério do Ambiente, do Ordenamento do Território e do Desenvolvimento Regional.
- IPTS, IES e DG-ENV, [ed.]. 2009.** Agricultura sustentável e conservação dos solos - Processos de degradação do solo. 2009. "Sustainable Agriculture and Soil Conservation (the SoCo project)"; Institute for Prospective Technological Studies (IPTS) Institute for Environment and Sustainability(IES); Directorate-General for Environment (DG-ENV).
- Lesage, E. 2006.** *Behaviour of heavy metals in constructed treatment wetlands*. Ghent, Belgium : s.n., 2006. Faculty of Bioscience Engineering; Ghent University.
- Levy, J. 2008.** *Novas Fontes de Abastecimento de Água - Reutilização e Dessalinização*. 2008. Ecoserviços - Gestão de Serviços Ecológicos, Lda..
- Macêdo, L. S. e Barcos, W. B. 2008.** Toxicidade dos ametais no solo e nas plantas: uma revisão de literatura. *Tecnol. & Ciên. Agropec*. 2008, Vol. 2, pp. 39-42.
- Małoszewski, P., Wachniew, P. e Czuprynski, P. 2006.** Hydraulic Characteristics of a Wastewater Treatment Pond Evaluated through Tracer Test and Multi-Flow Mathematical Approach. *Polish Journal of Environmental Studies*. 2006, Vol. 15, pp. 105-110.
- Maloszewski, P., Wachniew, P. e Czuprynski, P. 2006.** Study of hydraulic parameters in heterogeneous gravel beds: Construted Wtlands in Nowa Slupia (Poland). *Journal of Hydrology*. 2006, Vol. 331, pp. 630-642.
- MAOTDR. 2000.** Plano Estratégico de Abastecimento de Água e de Saneamento de Águas Residuais (2000-2006). s.l. : Ministério do Ambiente, do Ordenamento do Território e do Desenvolvimento Regional, 2000.
- . 2007.** Plano Estratégico de Abastecimento de Água e de Saneamento de Águas Residuais (2007-2013). s.l. : Ministério do Ambiente, do Ordenamento do Território e do Desenvolvimento Regional, 2007.

- Marsili-Libelli, S. e Checchi, N. 2005.** Identification of dynamic models for horizontal subsurface constructed wetlands. *Ecological Modelling*. 2005, Vol. 187, pp. 201-218.
- Matos, J. S. e Monteiro, A. J. 2003.** Saneamento e Ambiente em Portugal – “Quo Vadis” Reflexões Sobre o Plano Estratégico de Abastecimento de Água e de Saneamento de Águas Residuais 2000-2006. Lisboa : s.n., 2003.
- Mendes, B. e Santos Oliveira, J.F. 2004.** *Qualidade da água para consumo humano*. Lisboa : LIDEL, 2004.
- Mengel, K. e Kirby, E.A. 2001.** *Principles of Plant Nutrition*. 5ª edição. Dordrecht : Kluwer Academic Publishers, 2001. pp. 657,658.
- Nadell, C.D., Xavier, J.B. e Foster, K.R. 2009.** The social evolution of Biofilms. *FEMS Micro Rev.* 2009, Vol. 33(1), pp. 206-24.
- Oliveira, J. M. 2008.** *Estudo da Influência do Material de Enchimento na Remoção de Matéria Orgânica, Azoto e Sólidos em Leitos de Macrófitas do Tipo ESSH*. Lisboa : s.n., 2008. Universidade Nova de Lisboa; Faculdade de Ciências e Tecnologia; Departamento de Ciências e Engenharia do Ambiente.
- Oliveira., J. 1995.** *A Lagunagem em Portugal - Conceitos Básicos e Aplicações Práticas*. s.l. : Edições Universitárias Lusófonas, 1995.
- Payne, V. W.E., et al.** United States Department of Agriculture - Natural Resources Conservation Service. *National Engineering Handbook - Constructed Wetlands for Animal Waste Treatment*. [Online] [Citação: 24 de Junho de 2010.] <http://directives.sc.egov.usda.gov/viewerFS.aspx?id=3850v>. 3º Capítulo.
- Pereira, F.J.M. A. 2010.** *Scribd*. [Online] 21 de Janeiro de 2010. [Citação: 26 de Março de 2010.] Monografia universitária contendo uma descrição dos processos de fitorremediação de solos contaminados com resíduos tóxicos. <http://www.scribd.com/doc/25509817/Fitotecnologia-na-remediacao-de-solos-contaminados>.
- Quelhas dos Santos, J. 1996.** *Fertilização - Fundamentos da Utilização dos adubos e correctivos*. 2ª edição. Mem-Martins : Europa-América, 1996.
- Ribeiro, J.P. L. 2007.** *Modelação do Comportamento Hidráulico de Leitos de Macrófitas - Estudo Referenciado em Dados de Instalações Protótipo em Portugal (Projecto FCT SPESSA)*. Lisboa : s.n., 2007. Instituto Superior Técnico; Universidade Técnica de Lisboa.
- Seco, T. C., et al. 2008.** Avaliação do Desempenho de Sistemas de Leitos de Macrófitas no Tratamento de Águas Residuais Domésticas. *Engenharia Civil - UM*. 2008, Vol. 33.
- Simões, M. 2008.** Métodos cromatográficos, volumétricos e potenciométricos para análise química quantitativa de água subterrânea e sua aplicação no aquífero cenozóico da bacia do baixo Tejo, Portugal. *Geociências*. 2008, Vol. 27, pp. 161-169.
- Soromenho-Marques, Viriato. 2010.** A última gota - Desafios globais da água no século XXI. *National Geographic, Portugal*. 2010, Vol. 10, Água.
- Truu, M., Juhanson, J. e Truu, J. 2009.** Microbial biomass, activity and community composition in constructed wetlands. *Science of the Total Environment*. 2009, Vol. 407, pp. 3958-3971.
- Varennnes, A. 2003.** *Produtividade dos Solos e Ambiente*. Lisboa : Escolar Editora, 2003. p. 37.

**Veríssimo, S. H. 1997.** *A técnica das cápsulas porosas como método alternativo de amostragem da solução do solo.* Lisboa : s.n., 1997. Universidade Técnica de Lisboa; Instituto Superior de Agronomia.

**Vymazal, J. 2005.** Horizontal sub-surface flow and hybrid constructed wetlands systems for wastewater treatment. *Ecological Engineering*. 2005, Vol. 25, pp. 478-490.

—. **2007.** Removal of nutrients in various types of constructed wetlands. *Science of Total Environment*. 2007, Vol. 380, pp. 48-65.

**Wallace, Scott D. e Knight, Robert L. 2006.** *Small-Scale Construted Wetland Treatment Sistems - Feasibility, Design Criteria and O&M Requirements.* London : IWA, 2006. Water Environment Research Foundation - WERF.

**Wang, H. 2002.** *Describing and Predicting Breakthrough Curves for non-Reactive Solute Transport in Statistically Homogeneous Porous Media.* Blacksburg : s.n., 2002. Virginia Polytechnic Institute and State University.

**World Wild Life. 2008.** *Annual Report - Water for Life.* Gland : WWF INTERNATIONAL, 2008.

# ANEXOS

## ANEXO I – CAUDAIS DA FITO-ETAR

Dia	Caudal afluente (m <sup>3</sup> /s)	Caudal efluente (m <sup>3</sup> /s)	Dia	Caudal afluente (m <sup>3</sup> /s)	Caudal efluente (m <sup>3</sup> /s)
16-Jul	7,67E-05	3,85E-05	24-Ago	8,16E-05	6,04E-05
17-Jul	8,22E-05	2,54E-05	25-Ago	8,17E-05	5,55E-05
18-Jul	8,33E-05	3,74E-05	26-Ago	8,16E-05	5,48E-05
19-Jul	8,26E-05	4,59E-05	27-Ago	7,83E-05	5,6E-05
20-Jul	8,15E-05	4,45E-05	28-Ago	8,16E-05	5,58E-05
21-Jul	8,29E-05	4,65E-05	29-Ago	8,16E-05	5,55E-05
22-Jul	7,21E-05	4,41E-05	30-Ago	8,16E-05	5,65E-05
23-Jul	7,78E-05	4,39E-05	31-Ago	7,83E-05	5,5E-05
24-Jul	7,68E-05	3,44E-05	01-Set	8,5E-05	5,85E-05
25-Jul	7,42E-05	2,71E-05	02-Set	8,77E-05	6,02E-05
26-Jul	7,12E-05	1,57E-05	03-Set	8,64E-05	6,05E-05
27-Jul	7,55E-05	3,02E-05	04-Set	8,67E-05	6,11E-05
28-Jul	6,11E-05	3,01E-05	05-Set	8,34E-05	6,97E-05
29-Jul	8,17E-05	4E-05	06-Set	8,17E-05	5,48E-05
30-Jul	8,16E-05	4,14E-05	07-Set	8,17E-05	5,55E-05
31-Jul	8,16E-05	4,81E-05	08-Set	7,99E-05	6E-05
01-Ago	8,34E-05	5,01E-05	09-Set	7,68E-05	5,72E-05
02-Ago	8,34E-05	7,82E-05	10-Set	7,83E-05	5,74E-05
03-Ago	8,17E-05	7,82E-05	11-Set	8,16E-05	5,59E-05
04-Ago	8,17E-05	4,82E-05	12-Set	7,99E-05	5,53E-05
05-Ago	8,16E-05	4,14E-05	13-Set	8,16E-05	5,62E-05
06-Ago	8,16E-05	4,44E-05	14-Set	7,68E-05	5,79E-05
07-Ago	7,99E-05	4,5E-05	15-Set	7,99E-05	5,79E-05
08-Ago	7,83E-05	4,07E-05	16-Set	8,34E-05	6,48E-05
09-Ago	8,17E-05	4,8E-05	17-Set	8,17E-05	5,99E-05
10-Ago	3,95E-05	2,66E-05	18-Set	8,17E-05 <sup>o</sup>	5,99E-05 <sup>o</sup>
11-Ago	8,16E-05	3E-05	19-Set	8,17E-05 <sup>o</sup>	5,99E-05 <sup>o</sup>
12-Ago	7,83E-05	3,4E-05	20-Set	7,83E-05	5,93E-05
13-Ago	8,16E-05	4,22E-05	21-Set	7,83E-05 <sup>o</sup>	5,93E-05 <sup>o</sup>
14-Ago	8,17E-05	4,49E-05	22-Set	7,83E-05 <sup>o</sup>	5,93E-05 <sup>o</sup>
15-Ago	7,99E-05	4,54E-05	23-Set	8,16E-05	6,86E-05
16-Ago	8,16E-05	4,59E-05	24-Set	8,16E-05 <sup>o</sup>	6,86E-05 <sup>o</sup>
17-Ago	8,16E-05	5,18E-05	25-Set	8,16E-05 <sup>o</sup>	6,86E-05 <sup>o</sup>
18-Ago	8,17E-05	5,46E-05	26-Set	8,16E-05 <sup>o</sup>	6,86E-05 <sup>o</sup>
19-Ago	8,16E-05	5,44E-05	27-Set	8,17E-05	6,57E-05
20-Ago	8,16E-05	5,33E-05	28-Set	8,17E-05 <sup>o</sup>	6,57E-05 <sup>o</sup>
21-Ago	7,83E-05	5,19E-05	29-Set	8,17E-05 <sup>o</sup>	6,57E-05 <sup>o</sup>
22-Ago	8,13E-05	5,58E-05	30-Set	7,96E-05	6,48E-05
23-Ago	8,17E-05	5,57E-05			

<sup>o</sup> Valores adaptados.

Quadro 12 - Caudais afluentes e efluentes do sistema

## ANEXO II – NÍVEIS PIEZÓMETROS

	Profundidade no nível piézométrico (m)			Altura de água (m)		
26-Jul	0,020	0,130	0,340	0,680	0,609	0,372
27-Jul	0,005	0,080	0,330	0,695	0,659	0,382
28-Jul	0,005	0,060	0,350	0,695	0,679	0,362
29-Jul	0,045	0,110	0,350	0,655	0,629	0,362
30-Jul	0,015	0,045	0,350	0,685	0,694	0,362
31-Jul	0,020	0,040	0,365	0,680	0,699	0,347
01-Ago	0,010	0,080	0,345	0,690	0,659	0,367
02-Ago	0,000	0,001	0,342	0,700	0,738	0,370
03-Ago	0,010	0,015	0,330	0,690	0,724	0,382
04-Ago	0,015	0,065	0,345	0,685	0,674	0,367
05-Ago	0,017	0,065	0,337	0,683	0,674	0,375
06-Ago	0,016	0,069	0,348	0,684	0,670	0,364
07-Ago	0,015	0,045	0,344	0,685	0,694	0,368
08-Ago	0,015	0,094	0,340	0,685	0,645	0,372
09-Ago	0,018	0,085	0,350	0,682	0,654	0,362
10-Ago	0,072	0,150	0,347	0,628	0,589	0,365
11-Ago	0,010	0,145	0,354	0,690	0,594	0,358
12-Ago	0,019	0,105	0,356	0,681	0,634	0,356
13-Ago	0,004	0,094	0,352	0,696	0,645	0,360
14-Ago	0,006	0,053	0,347	0,694	0,686	0,365
15-Ago	0,002	0,057	0,350	0,698	0,682	0,362
16-Ago	0,012	0,046	0,348	0,688	0,693	0,364
17-Ago	0,012	0,052	0,342	0,688	0,687	0,370
18-Ago	0,013	0,055	0,351	0,687	0,684	0,361
19-Ago	0,010	0,049	0,349	0,690	0,690	0,363
20-Ago	0,005	0,030	0,340	0,695	0,709	0,372
21-Ago	0,007	0,029	0,349	0,693	0,710	0,363
22-Ago	0,000	0,000	0,345	0,700	0,739	0,367
23-Ago	0,000	0,000	0,347	0,700	0,739	0,365
24-Ago	0,006	0,005	0,340	0,694	0,734	0,372
25-Ago	0,005	0,002	0,345	0,695	0,737	0,367
26-Ago	0,006	0,006	0,342	0,694	0,733	0,370
27-Ago	0,004	0,008	0,340	0,696	0,731	0,372
28-Ago	0,004	0,025	0,344	0,696	0,714	0,368
29-Ago	0,002	0,022	0,343	0,698	0,717	0,369
30-Ago	0,003	0,027	0,345	0,697	0,712	0,367
31-Ago	0,004	0,011	0,346	0,696	0,728	0,366
01-Set	0,008	0,005	0,349	0,692	0,734	0,363
02-Set	0,006	0,006	0,348	0,694	0,733	0,364

	Profundidade no nível piezométrico (m)			Altura de água (m)		
<b>03-Set</b>	0,000	0,019	0,353	0,700	0,720	0,359
<b>04-Set</b>	0,000	0,027	0,354	0,700	0,712	0,358
<b>05-Set</b>	0,001	0,005	0,351	0,699	0,734	0,361
<b>06-Set</b>	0,000	0,002	0,348	0,700	0,737	0,364
<b>07-Set</b>	0,000	0,001	0,343	0,700	0,738	0,369
<b>08-Set</b>	0,000	0,023	0,346	0,700	0,716	0,366
<b>09-Set</b>	0,000	0,035	0,347	0,700	0,704	0,365
<b>10-Set</b>	0,000	0,026	0,347	0,700	0,713	0,365
<b>11-Set</b>	0,000	0,024	0,349	0,700	0,715	0,363
<b>12-Set</b>	-0,001	0,023	0,352	0,701	0,716	0,360
<b>13-Set</b>	0,000	0,017	0,353	0,700	0,722	0,359
<b>14-Set</b>	0,000	0,005	0,355	0,700	0,734	0,357
<b>15-Set</b>	0,000	0,001	0,352	0,700	0,738	0,360
<b>16-Set</b>	0,000	0,003	0,353	0,700	0,736	0,359
<b>17-Set</b>	0,000	0,001	0,359	0,700	0,738	0,353
<b>20-Set</b>	0,004	0,003	0,350	0,696	0,736	0,362
<b>23-Set</b>	0,002	0,002	0,345	0,698	0,737	0,367
<b>27-Set</b>	0,005	0,005	0,342	0,695	0,734	0,370
<b>30-Set</b>	0,000	0,002	0,340	0,700	0,737	0,372

**Quadro 13** - Profundidade do nível piezométrico em relação à cota do enchimento e nível piezométrico em relação à soleira do leito 5



## ANEXO III – ARMAZENAMENTO DOS SUB-VOLUMES DO LEITO 5

	Volumen parciais (m³) (volumen ocupado pelo enchimento e fluido no nível piezométrico)			Volumen de fluido em cada sub-volumen ao nível piezométrico (m³)		
	Volume 1	Volume 2	Volume 3	Volume 1	Volume 2	Volume 3
26-Jul	97,10	80,52	53,12	43,51	36,08	23,80
27-Jul	99,25	87,13	54,55	44,47	39,04	24,44
28-Jul	99,25	89,78	51,69	44,47	40,23	23,16
29-Jul	93,53	83,16	51,69	41,91	37,27	23,16
30-Jul	97,82	91,76	51,69	43,83	41,12	23,16
31-Jul	97,10	92,42	49,55	43,51	41,42	22,20
01-Ago	98,53	87,13	52,41	44,15	39,04	23,48
02-Ago	99,96	97,58	52,84	44,79	43,73	23,68
03-Ago	98,53	95,73	54,55	44,15	42,90	24,44
04-Ago	97,82	89,12	52,41	43,83	39,93	23,48
05-Ago	97,53	89,12	53,55	43,70	39,93	24,00
06-Ago	97,68	88,59	51,98	43,77	39,70	23,29
07-Ago	97,82	91,76	52,55	43,83	41,12	23,55
08-Ago	97,82	85,28	53,12	43,83	38,21	23,80
09-Ago	97,39	86,47	51,69	43,64	38,75	23,16
10-Ago	89,68	77,87	52,12	40,18	34,89	23,36
11-Ago	98,53	78,53	51,12	44,15	35,19	22,91
12-Ago	97,25	83,83	50,84	43,58	37,56	22,78
13-Ago	99,39	85,28	51,41	44,54	38,21	23,04
14-Ago	99,10	90,70	52,12	44,41	40,64	23,36
15-Ago	99,67	90,18	51,69	44,66	40,41	23,16
16-Ago	98,25	91,63	51,98	44,02	41,06	23,29
17-Ago	98,25	90,84	52,84	44,02	40,70	23,68
18-Ago	98,10	90,44	51,55	43,96	40,53	23,10
19-Ago	98,53	91,23	51,84	44,15	40,88	23,23
20-Ago	99,25	93,75	53,12	44,47	42,01	23,80
21-Ago	98,96	93,88	51,84	44,34	42,07	23,23
22-Ago	99,96	97,72	52,41	44,79	43,79	23,48
23-Ago	99,96	97,72	52,12	44,79	43,79	23,36
24-Ago	99,10	97,06	53,12	44,41	43,49	23,80
25-Ago	99,25	97,45	52,41	44,47	43,67	23,48
26-Ago	99,10	96,92	52,84	44,41	43,43	23,68
27-Ago	99,39	96,66	53,12	44,54	43,31	23,80
28-Ago	99,39	94,41	52,55	44,54	42,30	23,55
29-Ago	99,67	94,81	52,69	44,66	42,48	23,61
30-Ago	99,53	94,14	52,41	44,60	42,19	23,48
31-Ago	99,39	96,26	52,26	44,54	43,13	23,42
01-Set	98,82	97,06	51,84	44,28	43,49	23,23
02-Set	99,10	96,92	51,98	44,41	43,43	23,29

	Volumes parciais (m³) (volume ocupado pelo enchimento e fluido no nível piezométrico)			Volume de fluido em cada sub-volume ao nível piezométrico (m³)		
	Volume 1	Volume 2	Volume 3	Volume 1	Volume 2	Volume 3
03-Set	99,96	95,20	51,27	44,79	42,66	22,97
04-Set	99,96	94,14	51,12	44,79	42,19	22,91
05-Set	99,82	97,06	51,55	44,73	43,49	23,10
06-Set	99,96	97,45	51,98	44,79	43,67	23,29
07-Set	99,96	97,58	52,69	44,79	43,73	23,61
08-Set	99,96	94,67	52,26	44,79	42,42	23,42
09-Set	99,96	93,09	52,12	44,79	41,71	23,36
10-Set	99,96	94,28	52,12	44,79	42,25	23,36
11-Set	99,96	94,54	51,84	44,79	42,36	23,23
12-Set	100,10	94,67	51,41	44,86	42,42	23,04
13-Set	99,96	95,47	51,27	44,79	42,78	22,97
14-Set	99,96	97,06	50,98	44,79	43,49	22,84
15-Set	99,96	97,58	51,41	44,79	43,73	23,04
16-Set	99,96	97,32	51,27	44,79	43,61	22,97
17-Set	99,96	97,58	50,41	44,79	43,73	22,59
20-Set	99,39	97,32	51,69	44,54	43,61	23,16
23-Set	99,67	97,45	52,41	44,66	43,67	23,48
27-Set	99,25	97,06	52,84	44,47	43,49	23,68
30-Set	99,96	97,45	53,12	44,79	43,67	23,80
Média	98,84	92,72	52,13	44,29	41,55	23,36
Volume médio de fluido armazenado diariamente						109,1944

Quadro 14 - Volumes ocupados pelo enchimento e pelo fluido ao nível piezométrico.

## ANEXO IV – MASSA DE IÕES BROMETO EMITIDA NO EFLUENTE

<b>Amostra</b>	<b>Horas decorrentes (h)</b>	<b>Massa Específica Br<sup>-</sup> (kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Massa por dia (kg/dia)</b>	<b>Massa Acumulada</b>
<b>A</b>	0	0,001012	0,003	-
<b>B</b>	24	0,001054	0,002	-
<b>C</b>	48	0,001188	0,004	-
<b>D</b>	72	0,001236	0,005	-
<b>E</b>	96	0,000973	0,004	-
<b>F</b>	120	0,001236	0,005	-
<b>G</b>	144	0,001097	0,004	-
<b>H</b>	168	0,000973	0,004	-
<b>I</b>	192	0,000973	0,003	-
<b>j</b>	216	0,000935	0,002	-
<b>k</b>	240	0,00096	0,001	0,0013
<b>4</b>	264	0,000898	0,002	0,0036
<b>18</b>	288	0,001394	0,004	0,0073
<b>27</b>	312	0,004811	0,017	0,0239
<b>40</b>	336	0,007174	0,026	0,0495
<b>55</b>	360	0,009489	0,039	0,0890
<b>64</b>	384	0,011134	0,048	0,1371
<b>80</b>	408	0,013596	0,092	0,2290
<b>90</b>	432	0,015328	0,104	0,3325
<b>97</b>	456	0,014727	0,061	0,3939
<b>104</b>	480	0,016603	0,059	0,4533
<b>111</b>	504	0,018717	0,072	0,5252
<b>114</b>	528	0,020275	0,079	0,6041
<b>117</b>	552	0,020275	0,071	0,6753
<b>120</b>	576	0,020275	0,084	0,7594
<b>123</b>	600	0,021962	0,050	0,8099
<b>126</b>	624	0,021962	0,057	0,8668
<b>129</b>	648	0,021962	0,065	0,9313
<b>132</b>	672	0,022857	0,083	1,0147
<b>135</b>	696	0,023789	0,092	1,1069
<b>138</b>	720	0,023789	0,093	1,2001
<b>141</b>	744	0,022857	0,091	1,2907
<b>144</b>	768	0,021101	0,094	1,3852
<b>147</b>	792	0,019481	0,092	1,4771
<b>150</b>	816	0,017984	0,085	1,5617
<b>153</b>	840	0,015953	0,073	1,6351
<b>156</b>	864	0,014727	0,066	1,7012
<b>159</b>	888	0,012552	0,060	1,7617
<b>162</b>	912	0,011134	0,054	1,8152
<b>165</b>	936	0,009117	0,048	1,8628

Amostra	Horas decorrentes (h)	Massa Específica de Br <sup>-</sup> (kg/m <sup>3</sup> )	Massa por dia (kg/dia)	Massa Acumulada
168	960	0,007771	0,037	1,9001
171	984	0,007466	0,035	1,9354
174	1008	0,007466	0,036	1,9715
177	1032	0,007466	0,036	2,0075
180	1056	0,006893	0,033	2,0406
183	1080	0,006114	0,030	2,0704
186	1104	0,005875	0,028	2,0983
189	1128	0,005423	0,027	2,1257
192	1152	0,003785	0,020	2,1454
195	1176	0,003358	0,018	2,1630
198	1200	0,003226	0,017	2,1800
201	1224	0,002862	0,017	2,1972
204	1248	0,002642	0,013	2,2097
207	1272	0,002642	0,013	2,2224
210	1296	0,002439	0,013	2,2350
213	1320	0,002163	0,011	2,2457
216	1344	0,002079	0,010	2,2560
219	1368	0,001997	0,010	2,2657
222	1392	0,002862	0,014	2,2794
225	1416	0,002749	0,013	2,2927
228	1440	0,002163	0,011	2,3035
231	1464	0,002079	0,010	2,3139
234	1488	0,001997	0,011	2,3251
237	1512	0,001997	0,010	2,3354
-	1536 <sup>o</sup>	0,001997 <sup>o</sup>	0,010 <sup>o</sup>	2,3458
-	1560 <sup>o</sup>	0,001997 <sup>o</sup>	0,010 <sup>o</sup>	2,3561
240	1584	0,001772	0,009	2,3652
-	1608 <sup>o</sup>	0,001772 <sup>o</sup>	0,009 <sup>o</sup>	2,3742
-	1632 <sup>o</sup>	0,001772 <sup>o</sup>	0,009 <sup>o</sup>	2,3833
243	1656	0,001772	0,011	2,3938
-	1680 <sup>o</sup>	0,001772 <sup>o</sup>	0,011 <sup>o</sup>	2,4043
-	1704 <sup>o</sup>	0,001772 <sup>o</sup>	0,011 <sup>o</sup>	2,4148
-	1728 <sup>o</sup>	0,001772 <sup>o</sup>	0,011 <sup>o</sup>	2,4253
246	1752	0,000973	0,006	2,4308
-	1776 <sup>o</sup>	0,000973 <sup>o</sup>	0,006 <sup>o</sup>	2,4364
-	1800 <sup>o</sup>	0,000973 <sup>o</sup>	0,006 <sup>o</sup>	2,4419
249	1824	0,000935	0,005	2,4471

<sup>o</sup> Valores adaptados

Nota - Todos os valores da massa específica foram medidos no efluente e incluem o nível natural de Brometos presente no sistema

**Quadro 15** - Massa específica, diária e acumulada de iões brometo.

## ANEXO V – MASSA DE IÕES BROMETO NA SOLUÇÃO DO ENCHIMENTO

Local de Amostragem	Profundidade (m)	Massa de iões brometo (g/kg – Peso Seco)
1	0,2	2,4E-03
	0,4	1,7E-03
	0,6	1,3E-03
2	0,2	4,3E-03
	0,4	1,2E-03
	0,6	1,4E-03
3	0,2	2,5E-03
	0,4	2,1E-03
	0,6	1,7E-03
4	0,2	2,8E-03
	0,4	1,9E-03
	0,6	1,3E-03
5	0,2	2,1E-03
	0,4	1,5E-03
	0,6	2,1E-03
6	0,2	2,9E-03
	0,4	3,1E-03
	0,6	2,3E-03
7	0,2	-
	0,4	2,2E-03
	0,6	2,5E-03
8	0,2	-
	0,4	3,4E-03
	0,6	4,8E-03
9	0,2	-
	0,4	2,0E-03
	0,6	2,4E-03

Quadro 16 - Massa de iões brometo extraída da solução do solo a diferentes profundidades.

## ANEXO VI – MASSA DE IÕES BROMETO EXTRAÍDA DAS DIFERENTES PARTES DOS MACRÓFITOS

Local de Amostragem	Natureza da Amostra	Massa de iões brometo (g/kg – Peso Seco)
1	Raiz	2,0E-02
	Caule	3,3E-02
	Folhas	4,7E-02
	Inflorescências	-
2	Raiz	2,6E-02
	Caule	3,2E-02
	Folhas	4,9E-02
	Inflorescências	-
3	Raiz	1,6E-02
	Caule	1,5E-02
	Folhas	4,7E-02
	Inflorescências	-
4	Raiz	1,4E-02
	Caule	2,0E-02
	Folhas	4,7E-02
	Inflorescências	-
5	Raiz	1,6E-02
	Caule	2,2E-02
	Folhas	4,8E-02
	Inflorescências	3,9E-02
6	Raiz	1,2E-02
	Caule	1,2E-02
	Folhas	4,2E-02
	Inflorescências	3,8E-02
7	Raiz	5,0E-03
	Caule	1,5E-02
	Folhas	3,9E-02
	Inflorescências	-
8	Raiz	7,6E-03
	Caule	1,5E-02
	Folhas	4,4E-02
	Inflorescências	-
9	Raiz	3,1E-03
	Caule	1,7E-02
	Folhas	4,1E-02
	Inflorescências	-

**Quadro 17** - Massa de iões brometos encontrada para as diferentes partes constituintes dos macrófitos recolhidos.

## ANEXO VII – MATÉRIA ORGÂNICA

Local de Amostragem	Profundidade (m)	Matéria Orgânica (g/kg de enchimento)
1	0,2	47,01
	0,4	37,86
	0,6	39,39
2	0,2	67,77
	0,4	32,76
	0,6	36,12
3	0,2	32,03
	0,4	38,77
	0,6	30,42
4	0,2	61,91
	0,4	56,51
	0,6	38,00
5	0,2	39,36
	0,4	23,62
	0,6	23,35
6	0,2	41,21
	0,4	39,82
	0,6	37,00
7	0,2	-
	0,4	27,96
	0,6	29,31
8	0,2	-
	0,4	33,38
	0,6	37,97
9	0,2	-
	0,4	36,19
	0,6	26,56

Quadro 18 - Matéria orgânica existente no leito 5 a diferentes profundidades.